Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT 1/08 JANUAR 2008

SERIE GEHIRN (TEIL II)
Debatte: Wie funktioniert Bewusstsein?

QUASARE
Neues von den Strahlungsmonstern

SONNENSYSTEM
Das Boot ist voll – mit Planeten

ZUM JAHR DER **MATHE-MATIK**

Neues aus der Welt der Fraktale

Mit Computerexperimenten entdecken Forscher rätselhafte Geometrien

7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E

www.spektrum.de

EDITORIAL

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Das Boot ist voll!

Die Frage, wie gut unser Planetensystem gegen Störungen von außen und innen gewappnet ist, beschäftigt nicht nur Mathematiker und Astronomen seit Jahrhunderten. Als Mensch möchte man ja schließlich gern wissen, ob die Erde auch künftig noch verlässlich um die Sonne ziehen wird.

Unterstützt von Supercomputern kann man heute die planetaren Bewegungen im Sonnensystem mit hoher Präzision, wenn auch nicht für alle Zukunft, simulieren und ebenfalls ihre Stabilität untersuchen. Die neuen Resultate sind verblüffend. Unser Planetensystem ist, trotz weit gehend leerer (Welt-)Räume, bereits randvoll, jedenfalls unter Gesichtspunkten der Stabilität. Das klingt reichlich paradox, ist aber ein Segen: Noch stärkeres planetares Gedränge würde auf der Erde eine Unruhe stiften, die uns nicht guttäte (S. 26).

Zum Jahr der Mathematik 2008 passt das Titelthema dieser Ausgabe: Fraktale. Zwar verhalf ihnen erst der IBM-Forscher Benoît Mandelbrot mit dem »Apfelmännchen« so richtig zum Durchbruch. Doch reichen Vorläuferideen bis weit ins 19. Jahrhundert zurück, insbesondere bis zum Mathematiker Felix Klein (1849 – 1925). Warum wir uns jetzt mit Fraktalen befassen? Vor einigen Jahren erschien das Fachbuch »Indra's Pearls – The Vision of Felix Klein« über neuartige fraktale Gebilde. Das Werk enthält anspruchsvollen Stoff und ist deshalb nur mathematisch Eingeweihten anzuraten. Aber seine Ergebnisse, nämlich wundersame fraktale Landschaften und vorweihnachtlich verzaubernde Geometrien, sind seitdem – gleichfalls mit Computerhilfe – der Visualisierung zugänglich geworden.

Unser Mathematikredakteur Christoph Pöppe hat seit Langem ein Faible für geometrische Gebilde. Der Medienpreisträger der Deutschen Mathematiker-Vereinigung hat das Thema in seinem Beitrag so aufbereitet, dass auch Normalsterbliche etwas davon haben (S. 72).

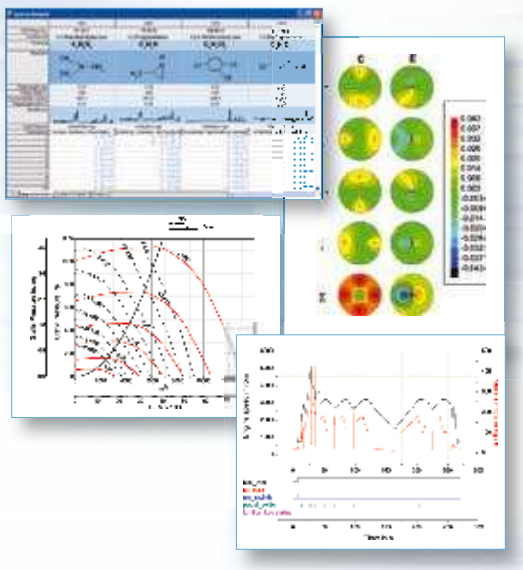
Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

NEU: unser Blogportal WISSENSlogs

Seit Kurzem ist das Blogportal von Spektrum der Wissenschaft in Betrieb. Über ein Dutzend Forscher und Wissenschaftsjournalisten notieren darin Gedanken, die um die Forschung kreisen: Kurioses und Weltbewegendes, Amüsantes und Aufregendes. Auch meine Tagebuch-Notizen sind jetzt von spektrum.de dorthin »umgezogen«. Besuchen Sie uns doch in der Blogosphäre!

ORIGIN 8
Der Datenanalyse- und Grafik-Workspace



Highlights in Origin 8 (• neue Funktionen):

- Technische Graphen in Publikationsqualität
- • Neue Arbeitsmappen mit mehreren Blättern und Arbeitsmappen-Manager
- • Sparklines und Meta-Daten im Spaltenkopf
- Microsoft® Office Integration
- Grafikformate als Design speichern
- • Neue Importformate: Axon pCLAMP®, ETAS INCA, imc FAMOS, Bild (BMP, GIF, JPG, uvm...), Kaleidagraph®, Minitab®, National Instruments DIAdem und TDM, netCDF, SigmaPlot®, uvm...
- • Analysetemplates mit Autoaktualisieren
- • Konsolidierte Reports für Ergebnisse
- • X-Funktionen und Kommandofenster
- ActiveX® und COM Support
- Drag&Drop- import, -analyse & -visualize

- • OriginPro 8 bietet alle Funktionen von Origin und darüber hinaus erweiterte Analysehilfsmittel für Statistik, 3D-Anpassung, Bild- und Signalverarbeitung.

Weitere Informationen zu Origin:
http://www.additive-origin.de/sdw

Kostenfreie Demoversion:
http://www.additive-origin.de/download

ADDITIVE
Soft- und Hardware für Technik und Wissenschaft

ADDITIVE GmbH
Max-Planck-Straße 22b · D-61381 Friedrichsdorf/Ts.
Telefon 06172-5905-(0)30 · Fax 06172-77613
E-Mail: origin@additive-net.de
www.additive-net.de • www.additive-origin.de

Copyright 2007 ADDITIVE GmbH. Alle Produktnamen sind eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Hersteller, Irrtum und Änderungen vorbehalten

INHALT

JANUAR 2008

MEDIZIN & BIOLOGIE Die Macht der Riboschalter

MEDIZIN & BIOLOGIE Wie funktioniert Bewusstsein?

ASTRONOMIE & PHYSIK Hell wie tausend Galaxien

AKTUELL

10 Spektrogramm
Klonembryonen von Affen · Nuancenreicher Bittergeschmack · Flüssige Festkörper · Pluripotenz aus der Haut u. a.

13 Bild des Monats
Furchtlose Maus

14 Superschneller Gletscher
Der größte Eisstrom Grönlands bewegt sich in Rekordtempo

17 Kommentar: Falsche Klimaskeptiker
Unbelehrbare Leugner des Klimawandels heizen Klimahysterie nur an

19 Schwarze Löcher als Super-Teilchenbeschleuniger
Sind aktive Galaxienkerne die Quelle extrem energiereicher Teilchen im All?

22 Mehr als Nachäffen
Affen können Beobachtungen nach dem Kontext bewerten

23 Springers Einwürfe
Seid gut zu Fliegen!

ASTRONOMIE & PHYSIK

26 ▶ Am Rande des Chaos
Das Sonnensystem ist randvoll mit Planeten. Käme nur einer hinzu, würde es – so zeigen auch neueste Untersuchungen an Exoplaneten – die Grenze zur Instabilität überschreiten

34 ▶ Hell wie tausend Galaxien
Trotz ihrer gigantischen Leuchtkraft sind Quasare kaum größer als unser Sonnensystem. Heute helfen sie heute sogar, die Entstehungsgeschichte von Galaxien aufzuklären

MEDIZIN & BIOLOGIE

42 ▶ Bewusstsein – Suche nach dem neuronalen Korrelat
Zwei Hirnforscher debattieren darüber, wie die Nervenzellen im Gehirn beim bewussten Erleben zusammenarbeiten

50 Schmerzende Muskeln
Sport macht Spaß. Wäre da nicht der lästige Muskelkater

52 Die Macht der Riboschalter
Die Entdeckung dieser Schaltelemente für Gene verblüffte. Doch nun könnten sie Wege zu neuartigen Antibiotika eröffnen

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial
8 Leserbriefe
9 Impressum
70 Im Rückblick
114 Vorschau

106 Rezensionen:
L. Jacquet – *Der Fuchs und das Mädchen*
Th. Damour – *Once upon Einstein*
T. Staud, N. Reimer – *Wir Klimaretter*
H. Schott, R. Tölle – *Geschichte der Psychiatrie*
W. Lenzen (Hg.) – *Ist Folter erlaubt?*

Titelmotiv: David Wright

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: www.spektrum.de/audio

TITELTHEMA

Die neue Kunst der Fraktale 72

62

ERDE & UMWELT
Gletscherschwund am Kilimandscharo

84

MENSCH & GEIST
Hera-Tempel in Paestum

ERDE & UMWELT

62 ▶ **Kilimandscharo – Gletscherschwund durch Klimawandel?**
Ernest Hemingway machte ihn einst berühmt: den Schnee auf dem Kilimandscharo. Heute wird die schrumpfende Eiskappe des Tropenvulkans gern als Kronzeuge für den Klimawandel bemüht – zu Unrecht

MENSCH & GEIST

ZUM JAHR DER MATHEMATIK

72 **TITEL: Fraktale Perlen**
Mit Computerexperimenten entdecken Mathematiker neuartige Geometrien – und zauberhafte Bilder

84 **Kolonien in »Großgriechenland«**
In der Antike emigrierten Griechen nach Italien und Sizilien

92 **ESSAY: Zweifel und Gewissheit** 🔊
Über den Missbrauch des Glaubens

96 **Monumentale Kaleidozyklen**
Umstülpbare Ringe aus Tetraedern

TECHNIK & COMPUTER

100 ▶ **Mit Licht ins Internet**
Licht als Datenträger bietet ungeahnte Möglichkeiten. Ein optischer Internetanschluss kann künftig Filme und virtuelle Gesprächspartner ins Wohnzimmer holen

Thema der Woche

e·on
Neue Energie

ONLINE

FÜR ABONNENTEN »Das Universum hacken« www.spektrum-plus.de

TIPPS Wissenschaftsblogs nach Wahl!
www.wissenslogs.de

FREIGESCHALTET »Der Mythos vom Teenager-Gehirn«
www.gehirn-und-geist.de/artikel/912987

spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Auf der Suche nach extrasolaren Planeten

Früher einmal war der Glaube an Planeten um ferne Sterne den Sciencefiction-Autoren vorbehalten. Dann aber machten immer ausgefeiltere Mess- und Spähtechniken aus der Sache des Glaubens eine des genauen Hinschauens – und siehe da: Exoplaneten kreisen offenbar in allen Ecken der Galaxis
www.spektrumdirekt.de/exoplaneten

Vulkane – die Feuer speienden Berge

Die eruptive Gewalt der Feuer speienden Berge zeugt von einer ungebrochenen Dynamik der Erde. Doch Vulkane verbreiten nicht nur Angst und Schrecken, sie bieten auch faszinierende Einblicke in das Innenleben unseres Planeten
www.spektrumdirekt.de/vulkane

TIPPS

Wissenschaftsblogs nach Wahl!

Gleich vier wissenschaftliche Blogportale hat der Verlag Spektrum der Wissenschaft nun etabliert. Unsere Autoren sind Raumfahrtexperten und Philosophen, Biologen und Psychologen, Mathematiker und Archäologen, Physiker und Mediziner, Historiker und Hirnforscher. Sie sind Wissenschaftler, Praktiker oder Journalisten – und jeder von ihnen kommentiert die Wissenschaftswelt aus seiner Perspektive. Diskutieren Sie mit auf

WISSENSlogs www.wissenslogs.de

BRAINLOGS www.brainlogs.de

CHRONOLOGS www.chronologs.de

KOSMOlogs www.kosmologs.de

INTERAKTIV

Flucht bis an den Südpol

Roald Amundsen: einer der größten Abenteurer und Forschungsreisenden des letzten Jahrhunderts und Bezwinger von Südpol und Nordwestpassage. Tor Bomann-Larsen lässt das Leben des Norwegers Revue passieren, ohne platte Heldenverehrung, dafür in erfrischend lakonischem Schreibstil. Nach unseren 5 × 5-Kriterien können Sie ihn auch selbst bewerten! Die Rezension finden Sie unter
www.spektrumdirekt.de/artikel/912086

Reingehört

Auch für Sehbehinderte und Blinde ist dieser Audioservice gedacht: Zehnmal pro Jahr stellen wir Ihnen einen Artikel aus Spektrum der Wissenschaft vor, auf etwa zehn Minuten Dauer gekürzt und von professionellen Sprecherinnen und Sprechern gelesen
www.spektrum.de/reingehoert

FÜR ABONNENTEN

»Das Universum hacken«

Die größte Informationsexplosion aller Zeiten war der Urknall. Das Universum verarbeitet auf der Ebene der Atome und Elementarteilchen permanent Information und funktioniert dabei wie ein gigantischer Quantencomputer, der die Vielfalt, Komplexität und Ordnung unserer Welt hervorbringt

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

»Wie junge Sterne überschüssigen Drehimpuls loswerden«

Astronomische Beobachter finden erste Hinweise auf rotierende molekulare Ausflüsse

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

www.suw-online.de/artikel/911839

»Der Mythos vom Teenager-Gehirn«

Aufmüpfiges, irrationales Verhalten Pubertierender gilt geradezu als unabwendbar. Forscher halten Umbauvorgänge im Gehirn für die Ursache. Der Psychologe Robert Epstein widerspricht. Denn das Chaos im Kopf tritt fast nur bei westlichen Teenagern auf.

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/912987

Spektrum.de

Heftarchiv
www.spektrum.de/archiv

Spektrum Notizen
www.spektrum.de/notizen

Spektrogramm
www.spektrum.de/spektrogramm

Spektrum Tagebuch
www.spektrum.de/tagebuch

Spektrum zum Hören
www.spektrum.de/hoeren

Spektrum in die Schulen
www.spektrum.de/wis

Der Mathematische Monatskalender
www.spektrum.de/monatskalender

Leserbriefe
www.spektrum.de/leserbriefe

Newsletter
www.spektrum.de/newsletter

DIESE UND WEITERE RUBRIKEN FINDEN SIE AUF DER NAVIGATIONSLEISTE UNSERER HOMEPAGE

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

Wir kennen die Geheimnisse des Schnees.

Für eine effiziente Nutzung von Wasserkraft gehen wir auch ungewöhnliche Wege. Wir schicken zum Beispiel jedes Jahr Techniker von E.ON in die Berge der Bayerischen Alpen. Bei Wind und Wetter sind sie dort unterwegs und erkunden Beschaffenheit, Höhe und Gewicht der Schneefelder. So ermitteln sie die Menge des Schmelzwassers, das unsere Wasserkraftwerke im Frühjahr in Energie umwandeln können. Das verbessert die Planung und macht Ihre Stromversorgung wieder ein Stück sicherer.

Mehr über E.ON und das Thema Wasserkraft erfahren Sie unter www.eon.com

e·on
Neue Energie

Der Mensch im Mittelpunktswahn?

Erde ohne Menschen, November 2007

Nettes Gedankenspiel

Der Artikel betreibt ein nettes Gedankenspiel. Aber bereits der Titel »Die Welt ohne uns – Reise über eine unbevölkerte Erde« ist falsch. Die Erde ist auch ohne uns bevölkert, nämlich mit Pflanzen und Tieren. Diese anthropozentrische Einstellung zieht sich wie ein roter Faden durch den Artikel. Auch die Frage »Wäre es nicht ein schmerzlicher Verlust, wenn die Menscheit von der Erde verschwände?« ist rührend naiv und gleichzeitig entlarvend für den noch immer vorherrschenden Mittelpunktswahn vieler Menschen.

Für wen soll es denn ein schmerzlicher Verlust sein? Für das »Individuum« ja; für »alle Kreaturen« auf unserem Planeten bestimmt nicht; für »das Universum« völlig belanglos.

Bei Lichte betrachtet ist unsere Spezies, bei aller Bewunderung für unsere Verstandesleistung, eine blutrünstige und barbarische Art, die, überspitzt formuliert, sämtliches Leben auf der Erde entweder in Nutztiere, Nutzplanzen oder in Schädlinge beziehungsweise Unkraut einteilt und entsprechend behandelt. Die innerhalb der eigenen Spezies unterdrückt, ausbeutet, mordet, foltert, sodass man sich schämen muss, dieser Art anzugehören. Wenn der Autor dann noch meint, unser Vieh würde uns vermissen, dann wird es vollends grotesk. Das Vieh, und hier speziell die völlig überzüchtete Milchkuh, ist nur insofern Verlierer, als sie ohne uns praktisch nicht mehr überlebensfähig ist.

Es gab noch nie und es wird nie eine Überlebensgarantie für eine Spezies auf diesem Planeten geben und das gilt auch für uns. Der Unterschied zum bisherigen Artensterben ist nur: Wir leisten massive aktive Sterbehilfe für die eigene Art.

Ich denke, dass der Autor sein Ziel, »die Umweltprobleme durch seine Betrachtungsweise in neuem Licht zu sehen« nicht erreicht, weil er den Verursacher zu sehr in eine Zuschauerrolle setzt.

Roland Schnack, Stuttgart

Konkretes Beispiel für Erde ohne Menschen

Dieser Artikel ist zwar nett, aber warum wird darin nur ein rein fiktives Beispiel, wie »die Stadt New York zerfällt«, ge-

Menschen überzeugen, die nicht mehr glauben

Der Gotteswahn, Rezension, November 2007

Als ich diese Besprechung las, fragte ich mich, ob Herr Dahl das Buch tatsächlich gelesen hat. Ich bin selbst noch mittendrin und kann daher nur zwei markante Punkte aufführen:

1. Zur Frage Theodizee: Am Ende des Kapitels 3 steht explizit die Begründung, warum Dawkins sie nicht für ein generelles Argument gegen einen Glauben an Gott hält (sondern nur gegen den Glauben an einen gütigen Gott!).

2. Zur allgemeinen Bewertung des Buchs überhaupt: Es wird sicher bei den überzeugten Atheisten und bei den überzeugten Gläubigen keine Weltbilder auf den Kopf stellen. Aber es kann bei den Atheisten, für die dieses ganze Thema bisher keine besondere praktische Relevanz hatte, die Einstellung ändern. Und es kann vielleicht Menschen überzeugen, die vieles oder das meiste nicht mehr glauben, was sie in den Kirchen hören, aber sich das bisher aus Tradition, Bequemlichkeit oder Opportunismus nicht eingestanden haben. Es ist ein Aufruf, für eine atheistische Überzeugung einzutreten, sie gesellschaftsfähig zu machen und vielleicht nach und nach den Einfluss zu re-

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels;
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Markus Fischer, Elena Hassinger, Dr. Rainer Kayser, Bernd Müller, Dr. Andrea Pastor-Zacharias.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de
Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls;
Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005;
Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283;
Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099;
Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555;
Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49;
München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01.12.2007.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

Die Erde ohne Menschen – bevölkert von Tieren und Pflanzen

FOTOILLUSTRATION: KENN BROWN

bracht, noch dazu ohne experimentelle Überprüfung, ob die in dem Artikel gemachten Behauptungen über die zeitliche Abfolge auch wirklich so eintreffen mögen.

Dabei gäbe es ganz konkrete Untersuchungsobjekte, Stichwort die Katastrophe von Tschernobyl. Aus der benachbarten Stadt Prypjat wurden damals schlagartig alle Menschen evakuiert und es setzte ein entsprechender Verwitterungsprozess der menschlichen Zivilisationsobjekte ein, der nun schon über zwanzig Jahre beobachtet werden kann.

Peter Maier, Wien

duzieren, den Religion in so vielen Bereichen des menschlichen Zusammenlebens beansprucht – zu Unrecht, wie Dawkins versucht zu begründen. Mich hat es auf jeden Fall sehr nachdenklich gemacht.

Anna Schmitz, Tübingen

Antwort des Rezensenten Edgar Dahl: Richard Dawkins' »Der Gotteswahn« ist ein ganz ausgezeichnetes Buch. Daran wollte ich in meiner Rezension nie Zweifel aufkommen lassen. Obgleich ich Hoersters Buch »Die Frage nach Gott« argumentativ nach wie vor für besser halte, steht es für mich außer Zweifel, dass Dawkins' Buch weit mehr Leser erreichen und weit eher ein Umdenken bewirken wird.

Das Leid und Elend dieser Welt ist in der Tat kein Argument gegen die Existenz eines Gottes. Es ist jedoch ein Argument gegen die Existenz eines gütigen Gottes. Das Theodizeeproblem besteht denn ja auch per definitionem darin, die Leiden dieser Welt mit der Güte Gottes zu vereinbaren.

Für mich ist es nach wie vor ein Rätsel, weshalb Dawkins nicht Darwin gefolgt ist und vor allem auf das sinnlose und unschuldige Leiden der Tiere hingewiesen hat. Das Leiden der Tiere über Jahrmillionen hinweg war für Darwin zu Recht der stärkste Einwand gegen die Existenz eines gütigen Gottes.

Lesen Sie das von mir herausgegebene Buch »Brauchen wir Gott?«, das neben Beiträgen von Norbert Hoerster, Hans Albert, Gerhard Vollmer und vielen anderen mehr auch einen Artikel von Richard Dawkins enthält und damit auch einen Beweis meiner Hochachtung für den Oxforder Aufklärer liefert.

Vom Kode zum Bewusstsein

Der Gedächtniskode, Oktober 2007

Joe Tsiens Artikel zeigt auf eindrückliche Weise, welche Fortschritte bei der Entschlüsselung der neuronalen Prozesse des Gehirns gemacht wurden. Das von David Chalmers formulierte »Hard Problem« dieses Forschungsgebiets bleibt aber nach wie vor ungelöst: Wie können die physikalischen Prozesse im Gehirn das subjektive Erleben auslösen? Oder anders gesagt: Welches ist die Verbindung zwischen Kode und Bewusstsein?

In meiner Doktorarbeit beschäftigte ich mich mit Strukturanalysen von Molekülen mit Hilfe der Kernspinresonanzspektroskopie. Dabei wird mit einem breitbandigen Radiopuls die sich in einem Magneten befindliche Molekülprobe angeregt und die Entwicklung des resultierenden Signals mit der Zeit registriert. Mittels Fourier-Transformation wird das Zeitsignal im Computer in das Frequenzspektrum umwandelt. Ich meine, die Brücke zwischen Kode und Bewusstsein muss ähnlich verlaufen: Das Gehirn rechnet den Kode in ein »Spektrum« um, das das bewusste Erleben darstellt. Das Bewusstsein wäre demnach ein mathematisches Konstrukt – Virtual Reality im Sinn des Worts.

Dr. Markus Straub, Zürich

Außerirdische, die extrem langsam leben

Was ist Leben? Essay, Oktober 2007

Die berechtigte Frage, ob wir außerirdisches Leben gegebenenfalls überhaupt erkennen könnten, wird letztlich immer wieder mit der Aussage bejaht, man müsse einfach nur eine Definition anwenden, die breit genug ist und dann genau hinsehen.

Auch Herr Hazen lässt nicht einmal anklingen, dass es prinzipiell für uns unmöglich sein könnte, solche Lebensformen zu identifizieren (und paradoxerweise erst recht dann, wenn sie so etwas wie »Intelligenz« entwickelt hätten). Dabei würde es schon genügen, sich vorzustellen, dass Lebensformen, deren Energieumsatz (und bei Intelligenz dann auch die Kommunikationsfähigkeit) gegenüber unserer vertrauten Zeitskala um signifikante Größenordnungen verlangsamt wäre, von uns schlichtweg deshalb übersehen würden, weil wir schon längst gestorben wären, bevor so ein »Wesen« eine einzige Lebenszustandsveränderung – beziehungsweise bei einem Kommunikationsversuch einen Sinnzusammenhang – übermittelt hätte.

Dr. Stefan Fabry, München

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

NORMAN LIM, NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE

Der Malaiengleitflieger – hier ein Weibchen mit einem in der Flughaut eingewickelten Jungen – ist eine von zwei heute noch existierenden Riesengleiterarten.

PALÄONTOLOGIE

Unsere Vettern, die Riesengleiter

■ Riesengleiter sehen aus wie eine Kreuzung aus Eichhörnchen und Fledermaus. Tatsächlich sind sie aber mit den Spitzhörnchen und den Affen verwandt. Gemeinsam mit diesen bilden sie die Gruppe der Euarchonta, deren Entwicklungslinie vor etwa 90 Millionen Jahren vom Stammbaum der anderen Lebewesen abzweigte. Über die Details der Verwandtschaftsbeziehung herrschte bisher allerdings Unklarheit.

Umstritten war vor allem, wem die Primaten am nächsten stehen – den Spitzhörnchen oder den Riesengleitern. Wissenschaftler um Jan E. Janecka von der Texas A & M University in College Station haben diese Frage nun mit DNA-Vergleichen geklärt. Dazu durchsuchten sie das Erbgut der Tiere nach Übereinstimmungen in seltenen Mutationen. Das Ergebnis: Sieben solche Genveränderungen haben die Primaten mit den Riesengleitern und nur eine mit den Spitzhörchen gemeinsam, während Riesengleiter und Spitzhörnchen keine einzige teilen. Außerdem verglichen die Forscher die Gensequenzen von zwei Riesengleiterarten sowie drei Spitzhörnchen- und sechs Primatengattungen miteinander und leiteten daraus ab, wann sich die verschiedenen Entwicklungslinien trennten.

Beide Analysen ergaben das gleiche Bild. Demnach sind die im heutigen Südostasien beheimateten Riesengleiter die engsten Verwandten der Primaten. Ihr letzter gemeinsamer Vorfahr lebte in der Kreidezeit vor etwa 80 Millionen Jahren – sechs Millionen Jahre nachdem sich die Spitzhörnchen von der gemeinsamen Entwicklungslinie abgespalten hatten. *Science, Bd. 318, S. 792*

GEOLOGIE

Magma-Aufstieg unter Yellowstone

■ Bei seiner letzten großen Eruption vor 640 000 Jahren – der dritten innerhalb von 1,5 Millionen Jahren – begrub der Yellowstone-Vulkan den gesamten Südwesten der USA unter einer bis zu 400 Meter hohen Ascheschicht. Durch den Einsturz der Erdkruste über der sich leerenden Magmakammer entstand ein riesiger Krater. Unterhalb dieser Caldera sammelt sich bis heute glühendes Magma aus dem Erdinneren. Davon zeugen die heißen Quellen und spektakulären Geysire im darüber gelegenen Yellowstone-Nationalpark.

Tatsächlich kommt die Caldera nicht zur Ruhe: Zwischen 1923, dem Jahr der ersten Messungen, und 1985 hatte sie sich um etwa 70 Zentimeter gehoben, danach allerdings wieder etwas gesenkt. Seit 1995 steigt ihr Boden erneut – und zwar in Rekordtempo. Das haben Forscher um Wu-Lung Chang an der Universität von Utah in Salt Lake City mittels GPS-Messungen und Daten des europäischen Umweltsatelliten Envisat ermittelt.

Demnach wölbte sich die Caldera zwischen 2004 und 2006 um knapp 18 Zentimeter auf – so schnell wie nie zuvor seit Beginn der Aufzeichnungen. Möglicherweise dringt derzeit neue Gesteinsschmelze von unten in die ehemalige Magmakammer ein. Das legt zumindest ein von den Wissenschaftlern entwickeltes Computermodell nahe. Dass Calderen sich heben und wieder absacken ist durchaus üblich und nicht unbedingt ein Zeichen für einen bevorstehenden Ausbruch. Bei Yellowstone mit seiner Vorgeschichte betrachten es die Forscher allerdings mit Argwohn. *Science, Bd. 318, S. 952*

SINNE

Bitter ist nicht gleich bitter

■ Sauer macht lustig, Süßes verführt – aber alles was bitter ist, entspricht gar nicht unserem Geschmack. Aus gutem Grund: Die meisten natürlichen Giftstoffe sind bitter, vor allem jene in Pilzen und Pflanzen. Der menschliche Geschmackssinn hat sich im Verlauf der Evolution dieser Gefahr angepasst. Deshalb reagieren die Sinnesorgane unserer Zunge besonders empfindlich auf Bitterstoffe. Aber können sie diese auch unterscheiden? Das war lange umstritten.

Es gibt Tausende von Bitterstoffen, aber nur 25 Rezeptoren zu ihrer Erkennung in den Sinneszellen der menschlichen Geschmacksknospen. Eine 1 : 1-Zuordnung ist also nicht möglich. Molekularbiologische Untersuchungen an Tieren deuteten sogar darauf hin, dass alle Geschmackszellen das komplette Sortiment an Bitterrezeptoren aufweisen. Dem widersprachen allerdings physiologische Untersuchungen. Demnach reagieren die Sinneszellen individuell verschieden auf den Kontakt mit Bitterstoffen.

Bei Experimenten mit menschlichen Zellkulturen konnten Forscher um Wolfgang Meyerhof und Maik Behrens vom Deutschen Institut für Ernährungsforschung in Potsdam-Rehbrücke die alte Streitfrage nun klären. Ihnen gelang der Nachweis, dass Geschmackszellen jeweils mit einem individuellen Satz von nur vier bis elf Bitterrezeptoren bestückt sind. Sie erkennen also nicht alle bitteren Substanzen, sondern nur einen Teil davon. Jede hat gleichsam ihren eigenen Geschmack.

Dazu passt, dass manche Menschen zwischen bitter und bitter unterscheiden – zum Beispiel Chicoree mögen, aber Grapefruits ungenießbar finden.

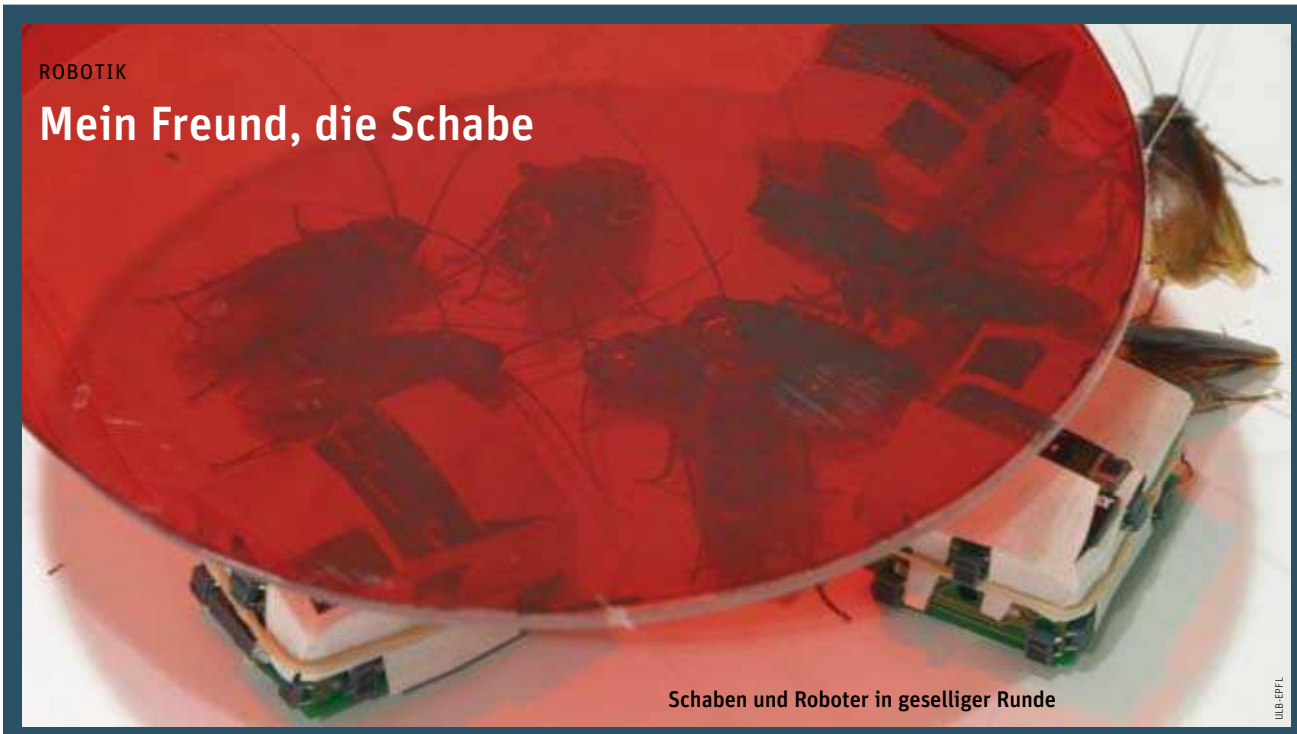
The Journal of Neuroscience, Bd. 27, S. 12 630

Die heißen Quellen im Yellowstone-Nationalpark zeugen vom Vulkanismus im Untergrund. Ihre Farbenpracht verdanken sie hitzeliebenden Bakterien.

HENRY HOLDSWORTH / ROBERT B. SMITH, UNIVERSITY OF UTAH

ROBOTIK

Mein Freund, die Schabe



Schaben und Roboter in geselliger Runde

ULB-EPFL

■ Schaben sind gesellig, Roboter eher nicht. Können sich beide trotzdem anfreunden? Den Beweis dafür haben Jose Halloy von der Freien Universität Brüssel und seine Mitarbeiter nun erbracht.

Zunächst betrieben die Forscher Verhaltensstudien. Sie setzten eine Gruppe Amerikanischer Großschaben *(Periplaneta americana)* in einem hellen Gehege mit zwei dunkleren Unterstellplätzen aus. Dort sammelten sich die sozialen Tiere binnen weniger Stunden, weil sie Dunkelheit instinktiv bevorzugen. Entsprechend den beobachteten Verhaltensmustern programmierten die Wissenschaftler anschließend einige schabengroße Roboter. Diese besaßen zwar weder Flügel noch Fühler und hatten auch sonst wenig mit einer Kakerlake gemein. Trotzdem wurden sie von den Insekten sofort akzeptiert. Das lag freilich nicht nur an ihrem Verhalten. Die Forscher hatten ihre Schützlinge zusätzlich mit den Pheromonen der Schaben einparfümiert.

Als vollwertige Mitglieder in die Gruppe aufgenommen, konnten die autonom handelnden Roboter das Verhalten der Kakerlaken sogar gezielt beeinflussen. Waren sie so programmiert, dass sie hellere Flecken des Geheges ansteuerten, folgten ihnen die meisten Insekten – entgegen ihrer instinktiven Abneigung. Hatten dann alle ein gemeinsames Plätzchen gefunden, schmiegten sie sich eng aneinander – klares Zeichen echter Freundschaft. *Science, Bd. 318, S. 1155*

STAMMZELLEN I

Erste Klonembryonen von Affen

■ Ist es möglich, Menschen zu klonen? Zwar ließ sich das 1996 beim Klonschaf Dolly erprobte Verfahren rasch auf andere Säugetiere übertragen – von der Maus über die Kuh bis zum Hund –, doch schon bei Affen scheiterten lange Jahre alle Versuche. Und wenn das Klonen bei ihnen nicht funktioniert, dürfte es beim Menschen schon gar nicht klappen.

Nun allerdings ist diese Hürde genommen worden. Shoukhrat Mitalipov von der Oregon Health and Science University in Beaverton gelang es, geklonte Embryonen von Rhesusaffen zu erzeugen. An dem prinzipiellen Verfahren, eine entkernte Ei- mit einer Körperzelle zu verschmelzen, änderten sie nichts. Doch verbesserten sie zwei Details. Zum einen machten Mitalipov und seine Mitarbeiter das abzusaugende Erbgut der Eizelle mit polarisiertem Licht sichtbar, statt es, wie bisher üblich, anzufärben. So konnten sie die DNA präziser und ohne möglicherweise schädliche Chemie entfernen.

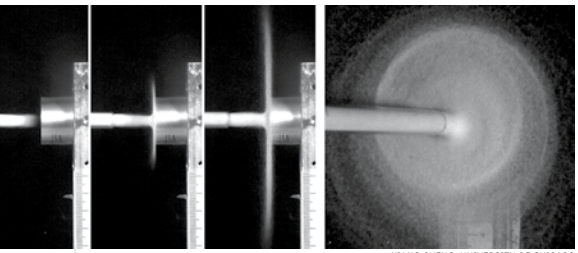
Zudem erkannten sie, dass Kalzium- und Magnesiumionen im Nährmedium schon die Embryonalentwicklung einleiten, bevor das Erbgut in der verschmolzenen Zelle genügend Zeit hatte, sich zu reprogrammieren, also in den embryonalen Urzustand zurückzukehren. Deshalb ließen sie die betreffenden Ionen zunächst weg.

So hatten sie Erfolg – allerdings nur mäßig. Aus 304 Eizellen konnten sie nicht mehr als 35 Klon-Embryonen und daraus lediglich zwei Stammzelllinien gewinnen. Das zeigt, dass das Verfahren noch keineswegs optimal ist. Dennoch haben sich die Chancen auf ein erfolgreiches Klonen beim Menschen deutlich verbessert.

Nature, Online-Vorabveröffentlichung vom 14. 11. 2007

In dieser Eizelle eines Rhesusaffen an der Spitze einer Pipette ist das Erbgut beleuchtet (heller Fleck oben) und kann nun abgesaugt werden.

SHOUKHRAT M. MITALIPOV, ONPRC



XIANG CHENG, UNIVERSITY OF CHICAGO

Beim Aufprall auf einen Zylinder fächert sich ein Teilchenstrahl zu einer flachen Scheibe auf. Deren Entstehung ist links von der Seite gezeigt; rechts das Endprodukt in Aufsicht.

PHYSIK

Flüssige Festkörper

■ Im Jahr 1833 entdeckte der Physiker Felix Savart einen überraschenden Effekt. Als er einen kräftigen Wasserstrahl vertikal auf das Ende eines geschlossenen Zylinders lenkte, bildete sich an der Aufprallstelle ein dünner Film, der weit über den Zylinderrand hinausschoss und den Körper wie eine hauchdünne Käseglocke umhüllte.

Sidney Nagel und Kollegen von der Universität Chicago (Illinois) machten den gleichen Versuch nun mit Partikeln: Sie richteten statt des Wassers einen Strahl mikroskopisch kleiner Glas- und Kupferkügelchen auf einen Stahlzylinder. Damit wollten sie prüfen, ob und unter welchen Bedingungen sich auch feste Teilchen wie eine Flüssigkeit verhalten können.

Tatsächlich stoben die Partikel oberhalb einer bestimmten Strahldichte senkrecht zu ihrer Ursprungsrichtung auseinander und bildeten eine flache Scheibe, die sich analog zum Wasserfilm über den Zylinderrand hinaus ausdehnte. Die Kügelchen waren offenbar derart dicht gepackt, dass sie wie die Moleküle einer Flüssigkeit immer wieder gegeneinander stießen und sich deshalb nach dem Aufprall nur gemeinsam in einer Ebene ausbreiten konnten. Verringerten die Forscher dagegen die Konzentration der Partikel, gewannen diese ihre Individualität zurück. Nun prallten sie einzeln von der Platte ab und spritzten wie bei einem Feuerwerk in alle Richtungen davon.

Physical Review Letters, Bd. 99, Artikel-Nr. 188001

STAMMZELLEN II

Alleskönner aus der Haut

■ Embryonale Stammzellen können sich zu jeder Gewebeart entwickeln. Aus ihnen sollten sich also nach Bedarf Ersatzorgane züchten lassen. Zur Gewinnung der Alleskönner müssen jedoch frühe Embryonen zerstört werden. Nun eröffnet sich ein Ausweg aus diesem moralischen Dilemma. Gleich zwei Forschergruppen ist es unabhängig voneinander gelungen, Zellen erwachsener Menschen in den Embryonalzustand zurückzuversetzen. Die Wissenschaftler um Shinya Yamanaka von der Universität Kioto wiederholten dazu ihr bei Mäusen bereits erfolgreiches Verfahren.

Mit Retroviren führten sie vier Gene, die normalerweise nur in embryonalen Stammzellen abgelesen werden, in die adulten Zellen ein. Diese produzierten daraufhin die Transkriptionsfaktoren OCT3/4, SOX2, KLF4 und c-MYC, die in der eingeschleusten DNA kodiert waren. Wissenschaftler um James Thomson von Universität von Wisconsin in Madison wählten denselben Weg, kombinierten die Gene für OCT3 und SOX2 aber mit denen für NANOG und LIN28 und übertrugen sie auf fötale Körperzellen sowie auf Vorhautzellen eines beschnittenen neugeborenen Jungen. Beide Gruppen hatten Erfolg.

Die Aktivität der von den Genen kodierten Proteine reichte aus, um die Zellen in induzierte embryonale Stammzellen umzuwandeln, die sich als gleichwertig zu solchen aus Embryonen erwiesen. So entwickelten sich daraus nach der Injektion in Mäuse Geschwülste, in denen die verschiedensten Gewebetypen vertreten waren. Im Ernst wären Retroviren als Genfähren allerdings ausgeschlossen, weil sie ein hohes Tumorrisiko bergen.

Cell und Nature, Online-Vorabpublikationen vom 20. 11. 2007

JEFF MILLER / UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON

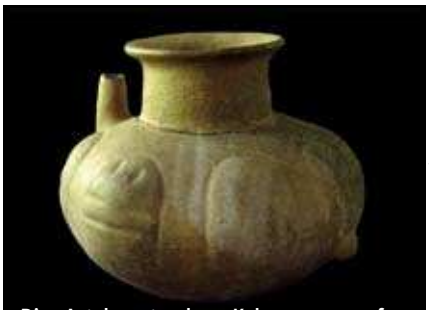
Aus menschlichen Fibroblasten ließen sich durch Genmanipulation diese pluripotenten Stammzellen erzeugen.

ARCHÄOLOGIE

Kakao mit Schuss

■ Kakao galt den Azteken als so kostbar, dass sie die Bohnen sogar einige Jahrhunderte als Währung verwendeten. Sie bereiteten daraus ein Getränk, das sie meist aufgeschäumt und mit exotischen Zutaten wie Honig oder Chili schlürften. Die Spanier brachten das Genussmittel mit nach Europa und leiteten damit seinen weltweiten Siegeszug ein. Aber wann wurde Kakao erstmals angebaut? Zwar gehörte der Begriff schon um 1000 v. Chr. zum Wortschatz der Olmeken, einer frühen Kultur am Golf von Mexiko. Die ältesten bekannten Reste der Droge selbst, gefunden in der Maya-Stätte Rio Azul in Guatemala, stammen jedoch aus dem 5. nachchristlichen Jahrhundert.

PNAS / NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES



Die Azteken tranken Kakao gern aufgeschäumt. Deshalb befand sich an den Kannen eine Tülle zum Hineinblasen.

Immerhin entdeckten Forscher 2002 einen Hinweis auf noch früheren Gebrauch. In 2600 Jahre alten Kannen aus Maya-Gräbern im Norden von Belize fanden sie Spuren von Theobromin, das in Mittelamerika nur im Kakaobaum vorkommt. Nun konnten John Henderson von der Cornell-Universität in Ithaca (New York) und Kollegen die gleiche Substanz sogar auf Kannenscherben nachweisen, die bei Ausgrabungen in Honduras geborgen worden waren und in die Zeit bis 1100 v. Chr. zurückreichen.

Allerdings bereitete man Kakao damals anscheinend nicht aus Bohnen zu. Das schließen die Forscher aus der rekonstruierten Form der Gefäße. Diese hatten anders als spätere Kakaokannen keine Tülle zum Hineinblasen, um Schaum zu erzeugen. In dem Behälter befand sich daher vermutlich einst *chicha*: vergorenes Fruchtfleisch, das ebenfalls Theobromin enthält. Der erste Kakao war demnach mit Schuss.

Proceedings of the National Academy of Sciences, Online-Vorabveröffentlichung vom 16. 11. 2007

Mitarbeit: Christoph Marty

Furchtlose Maus

Mäuse haben instinktiv Angst vor Raubtieren. Entscheidend dafür ist, wie Hitoshi Sakano von der Universität Tokio und Kollegen nun zeigten, der Geruchssinn. Genveränderte Mäuse, bei denen die Riechzellen in einem Teil der Nasenschleimhaut entfernt waren, zeigten keine Furcht vor Katzen. Sie näherten sich ihnen voller Neugier, ja spielten sogar mit ihnen – was gut ging, solange der Stubentiger wie hier so jung war, dass er noch keinen ausgeprägten Jagdinstinkt hatte. Das Erstaunlichste daran: Die Mäuse nahmen den Katzengeruch sehr wohl wahr; sie fanden ihn nur nicht mehr bedrohlich. Allerdings konnten sie nachträglich darauf trainiert werden, ihn zu meiden und Katzen aus dem Weg zu gehen.

KO UND REIKO KOBAYAKAWA

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Größter Gletscher Grönlands fließt in Rekordtempo

Aktuelle Messungen bestätigen, dass sich die Fließgeschwindigkeit des Jakobshavn-Isbræ-Gletschers verdoppelt hat – Indiz für ein beschleunigtes Abschmelzen des grönländischen Eisschilds wegen der globalen Erwärmung?

Von Hans-Gerd Maas, Reinhard Dietrich und Ellen Schwalbe

Der Jakobshavn-Isbræ-Gletscher, auf Grönländisch Sermeq Kujalleq, ist einer der aktivsten Gletscher der Welt. Er bildet zusammen mit dem etwa sechzig Kilometer langen Kangia-Fjord den Ilulissat Isfjord, den die Unesco 2004 zum Weltnaturerbe erklärt hat, und mündet an der Westküste Grönlands in die Davis Strait.

Schon 1893 stellte der dänische Marineleutnant R. R. J. Hammer bei Vermessungen fest, dass sich der Jakobshavn Isbræ extrem schnell bewegt: um zwanzig Meter pro Tag. Dieser Wert wurde im 20. Jahrhundert mehrfach durch geodätische oder fotogrammetrische Messungen überprüft und bestätigt. Berücksichtigt man die Breite und Höhe der Gletscherfront, ergibt sich daraus eine Eisproduktion von dreißig bis vierzig Kubikkilometer pro Jahr. Damit befördert der Gletscher rund sieben Prozent der jährlichen Niederschlagsmenge auf dem grönländischen Inlandeis ins Meer.

Bis etwa 2000 befand er sich dabei in einem mehr oder weniger stabilen Zustand und erreichte als zehn Kilometer breiter Eisstrom den Kangia-Fjord. Seitdem hat sich seine über hundert Meter hohe Front dramatisch zurückgezogen. Das zeigen Satellitenbilder – etwa Landsat-Aufnahmen –, auf denen sich das Gletscherende sehr gut erkennen lässt. Demnach ist der Jakobshavn Isbræ in nur drei Jahren – zwischen 2001 und 2004 – um mehr als zehn Kilometer geschrumpft. Inzwischen mündet er in Form zweier getrennter Eisströme aus Norden und Osten in den Kangia-Fjord. Gleichzeitig hat seine Dicke, wie Messungen der Nasa mit Laserscannern vom Flugzeug aus ergaben, um bis zu zehn Meter pro Jahr abgenommen.

Weltweit schmelzen derzeit die Gletscher (siehe S. 62). Hauptursache dürfte, wie viele Indizien nahe legen, die globale Erwärmung sein, ausgelöst durch vom Menschen freigesetzte Treibhausgase. Nach den Ergebnissen von Klimasimulationen sollten sich die Folgen in der Arktis besonders drastisch zeigen. Deshalb sind detaillierte Untersuchungen grönländischer Gletscher von großem Interesse.

Noch gravierender als deren Rückzug dürfte allerdings eine indirekte Folge davon sein. Wenn die schwimmende Gletscherfront wegschmilzt, kann sie dem nachdrängenden Eis nicht mehr so viel Widerstand entgegensetzen. Dadurch sollte sich die Fließbewegung beschleunigen. Das aber heißt, dass das grönländische Inlandeis schneller ins Meer abfließt und den Meeresspiegel erhöht.

Expedition ins Eis

Satellitenbilder eignen sich nur eingeschränkt dazu, die Geschwindigkeit eines Gletschers zu erfassen. Deshalb hat die Technische Universität Dresden schon 2004 eine erste und vergangenen August eine weitere Messkampagne vor Ort durchgeführt. Aus der Nähe wollten wir genaue Daten gewinnen, wie schnell sich der Gletscher bewegt und ob und wie sich sein Fließverhalten ändert.

Eine solche Expedition ist durchaus abenteuerlich. Vom Internationalen Airport Kangerlussuaq im Westen Grönlands geht es nach Ilulissat und von dort mit dem Hubschrauber in knapp einer Stunde an das Ende des Kangia-Fjords – in ein Niemandsland fernab jeder Zivilisation. Verpflegung und Ausrüstung für den zehntägigen Aufenthalt mussten wir mitbringen. Kampiert wurde in Zelten auf dem steinigen Boden einer Seitenmoräne des Gletschers. Der feine Staub dort hielt sich noch Monate nach der Rückkehr hartnäckig in unserer Ausrüstung.

Immerhin herrschte relativ warmes Wetter. Die Temperaturen lagen durchweg über dem Gefrierpunkt und erreichten teils 15 Grad Celsius. Allerdings wehte vom Eisschild herab fast stets ein unangenehm kalter Wind.

Gegenüber 2004 mussten wir unser Lager vergangenen Sommer rund zwei Kilometer tiefer im Inland aufschlagen, weil sich die Gletscherfront inzwischen weiter zurückgezogen hatte. Als wichtigstes Instrument positionierten wir am südlichen Eisrand eine Digitalkamera mit einer Auflösung von 39 Megapixeln, die uns die Firma IGI aus Kreuztal leihweise zur Verfügung gestellt hatte. Sie kann automatisch Serien von Aufnahmen in festgelegten Intervallen macht. Allerdings verbrauchte sie, wie sich erwies, ziemlich viel Strom, sodass wir öfter, als uns lieb war, einen frischen Bleiakku heranschleppen mussten.

Angesichts der zerklüfteten Oberfläche von Gletschern bietet sich die Fotogrammetrie als Werkzeug zum Bestimmen des Fließtempos an. Meist findet sich ein auffälliges Merkmal, dessen Verbleib in aufeinanderfolgenden Aufnahmen erkennbar ist. Da die Dynamik des Eisstroms keine nennenswerten Bewegungen quer zur Fließrichtung erwarten ließ, beschränkten wir uns auf Fotos mit einer senkrecht zur Fließrichtung orientierten Kamera.

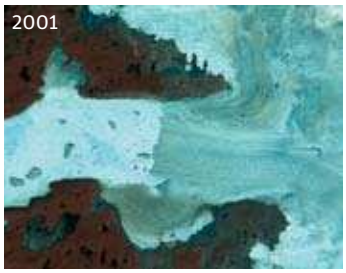
Wir erstellten mehrtägige Bildsequenzen mit 15-minütigen Intervallen im Bereich der Gletscherfront. Dank der Lage des Eisstroms auf etwa 70 Grad nördlicher Breite war es bis Anfang August auch nachts noch hell genug zum Fotografieren. Das aber hieß zugleich, dass an keinen Tagesrhythmus zu denken war. Wann immer günstige Wetterverhältnisse herrschten, nutzten wir das für unsere Untersuchungen aus. Und so kam es schon vor, dass wir nachts um zwei noch

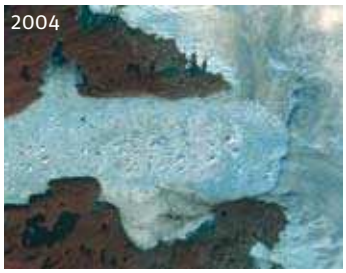
Sauerkraut für die Hauptmahlzeit des Tages kochten. Insgesamt hatten wir mit dem Wetter Glück: Es gab kaum Nebel und nur einmal 36 Stunden Dauerregen.

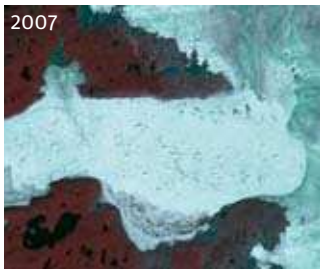
Die Auswertung der Aufnahmen erfolgte weit gehend automatisch durch Verfahren der fotogrammetrischen Bildsequenzanalyse. Zunächst wurden Bewegungen der Kamera, verursacht durch Windeffekte, Einsinken und Aufwärmung der Stativbeine sowie Instabilitäten des Untergrunds, kompensiert. Dabei dienten die Bildkoordinaten von vier ortsstabilen Zielmarken im Vordergrund als Bezugsgrößen. Anschließend ließen sich per fotogrammetrischer Bildanalyse in den Fotosequenzen automatisch an vorgegebenen oder auf einem Raster definierten Stellen Ausschnitte der Gletscheroberfläche verfolgen. Vielfach gelang es dabei, die betrachteten Punkte auf ein Zehntel Pixel genau zu lokalisieren.

Um die Wanderung eines ausgewählten Merkmals auf den Bildern in eine Geschwindigkeit auf der Gletscheroberfläche umrechnen zu können, bestimmten wir außerdem anhand von stereoskopischen Aufnahmen und geodätischen Messungen einen lokalen Bildmaßstab für jeden Punkt. Bei einem Normalwinkelobjektiv und einer Entfernung von zwei bis vier Kilometern zwischen Kamera und aufgenommenem Objekt ergab sich eine Messgenauigkeit von zwei bis vier Zentimetern an der Gletscheroberfläche.

Bei der Bildauswertung hatten wir allerdings mit erschwerenden Bedingungen zu kämpfen. So änderten immer wieder durchziehende Wolkenfelder die







ALLE FOTOS: GOOGLE EARTH / LANDSAT

Vor sechs Jahren ragte der Jakobshavn-Isbræ-Gletscher noch ein gutes Stück in den Kangia-Fjord hinein (unten). Den größten Teil des Fjords füllten allerdings auch damals schon abgebrochene Eisbrocken. Seither hat sich die Gletscherfront, wie die Detailaufnahmen von 2001, 2004 und 2007 zeigen, um mehr als zehn Kilometer zurückgezogen.

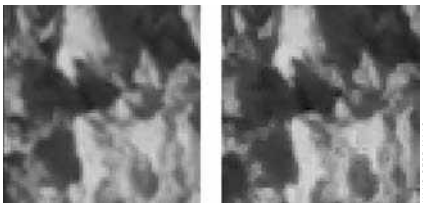
Beleuchtungsverhältnisse. Hinzu kamen starke Variationen im Schattenwurf durch die tief stehende, nie untergehende Sonne, die im Tagesverlauf einen vollen Kreis beschrieb. Das erwies sich vor allem an Stellen mit extrem zerklüftetem Eis als hinderlich.

Dennoch erhielten wir am Ende für mehr als 4000 Gletscherpunkte genaue Bewegungslinien (Trajektorien) über Zeiträume von mindestens 24 Stunden. Sie dokumentieren, dass sich der Gletscher in seinem Frontbereich in Fließrichtung sehr gleichmäßig um etwa vierzig Meter pro Tag bewegt. Damit hat sich seine Geschwindigkeit gegenüber dem langjährigen Mittel des 20. Jahrhunderts verdoppelt – primär wohl eine Folge der nun fehlenden Stabilisierung durch die Gletscherzunge. Dieses Ergebnis hatten wir schon 2004 erhalten. Mit genaueren Aufnahmen konnten wir es letzten Sommer bestätigen. Zugleich zeigten die neuen Messungen, dass die enorme Zunahme des Fließtempos nicht nur ein kurzzeitiges Phänomen war, sondern unvermindert anhält.

Im Jahr 2004 hatten wir außerdem festgestellt, dass sich die Gletscheroberfläche innerhalb von 24 Stunden jeweils zweimal um insgesamt etwa 1,5 Meter hob und senkte. Diese vertikale Bewegung reproduzierte mit einer leichten Dämpfung und Phasenverzögerung exakt die Gezeitenkurve für einen Pegel in Ilulissat, das etwa fünfzig Kilometer westlich an der Mündung des Kangia-Fjords in die Diskobucht liegt. Damit konnte erstmals bewiesen werden, dass die Gletscherzunge in ihrem vorderen Bereich nicht bis zum Boden reichte, sondern auf dem Fjord aufschwamm.

Der vertikale Hub der Trajektorien nahm damals in östlicher Richtung ab. Die detaillierte Analyse dieser Verringerung ergab, dass die Aufsetzlinie des Gletschers, hinter der er bis zum Boden reicht, vor drei Jahren etwa einen Kilometer hinter der Gletscherfront lag.

Unseren neuen Messungen zufolge hat sich der Jakobshavn Isbræ inzwischen bis hinter diese Linie zurückgezogen, schwimmt also auch an seinem Vorderende nicht mehr auf. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf sein Kalbungsverhalten. Bis 2004 brachen vom aufschwimmenden Schelfeis große Eisberge – teils mit Flächen über einem Quadratkilometer – ab, deren majestätischer Anblick den Betrachter beeindruckte. Nun produziert der Gletscher die gleiche Eismenge in wesentlich kleineren Brocken. Auch wenn dadurch die Gefährdung von Schifffahrt und Bohrplattformen im Nordatlantik abnimmt, ist die erhöhte Geschwindigkeit mit vermehrter Kalbeisproduktion ein Besorgnis erweckendes Anzeichen des Klimawandels. Ob sie anhalten wird und ob benachbarte Gletscher an der Westküste Grönlands ein ähnliches Verhalten zeigen, sind spannende Fragen für künftige Messkampagnen.



HANS-GERD MAAS

Zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit wurde in den Aufnahmen des Gletschers mit Verfahren der fotogrammetrischen Bildsequenzanalyse die Bewegung charakteristischer Strukturen verfolgt. Hier sind 40 × 40-Pixel-Ausschnitte in zwei aufeinander folgenden Bildern gezeigt.

Hans-Gerd Maas ist Professor für Fotogrammetrie und **Reinhard Dietrich** Professor für Theoretische und Physikalische Geodäsie an der Technischen Universität Dresden, wo **Ellen Schwalbe** am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung ihre Doktorarbeit anfertigt.

HANS-GERD MAAS

Die hochauflösende Digitalkamera rechts im kleinen oberen Bild machte in Abständen von 15 Minuten Aufnahmen des Gletschers. Links neben ihr steht eine GPS-Antenne. Das untere Bild zeigt eines der Digitalfotos.

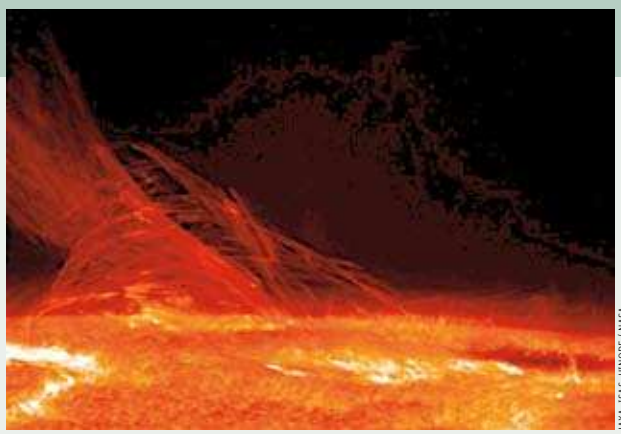
Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

KOMMENTAR

Falsche Klimaskeptiker

Pseudoexperten, die mit haltlosen Argumenten eine angebliche Klimamafia anprangern, bringen ernst zu nehmende Forscher in Misskredit, die begründete Zweifel am Schreckensszenario eines katastrophalen anthropogenen Klimawandels hegen.

Von Sven Titz



JAXA, ISAS, HINODE / NASA

Die Aktivität der Sonne – hier bei einer Eruption ausgestoßene Plasmafäden – hat in den letzten drei Jahrzehnten nachweislich nicht zugenommen. Trotzdem wollen viele »Klimaskeptiker« den Klimawandel mit einer solchen Zunahme erklären.

Immer wieder machen so genannte Klimaskeptiker mit kühnen Behauptungen von sich reden. Es ist eine uneinheitliche Gruppe, die einen vom Menschen verursachten Klimawandel rundweg abstreitet. Besonders viel Aufsehen erregte vor ein paar Monaten der Film »The Great Global Warming Swindle« von Martin Durkin. Zunächst lief er im britischen Privatsender Channel 4, später in einer revidierten Fassung auch im deutschen Fernsehen auf RTL. Durkin versucht darin zu belegen, dass die globale Erwärmung von einer veränderten Sonnenaktivität herrühre.

Ein weiteres Beispiel: In der Zeitschrift »Energy & Environment« vom März 2007 behauptete der Diplombiologe und Lehrer Ernst-Georg Beck, die Verfasser des UN-Klimaberichts hätten CO_2-Messdaten verschwiegen, die der gängigen Lehrmeinung widersprechen *(Bd. 18, S. 259)*. In Wirklichkeit sei die Konzentration von Kohlendioxid in den vergangenen zwei Jahrhunderten schon mehrfach so hoch gewesen wie heute. Becks These hat in den Internetforen der »Skeptiker« viele Anhänger gefunden.

Sowohl Durkins Film als auch Becks Artikel sind freilich mit Fehlern gespickt. So haben Änderungen der Sonnenaktivität in den vergangenen drei Jahrzehnten nach allem, was wir wissen, nicht zur globalen Erwärmung beigetragen. Allenfalls könnte ein anderer Effekt eine Rolle spielen: Derzeit läuft am Europäischen Kernforschungszentrum Cern ein groß angelegtes Experiment zur Wirkung kosmischer Strahlung auf die Atmosphäre. Manche Experten vermuten, dass die Sonne den Strom von Teilchen aus dem Kosmos und damit die Wolkenentstehung auf der Erde beeinflusst. Doch bislang ist die Beweislage zu dünn, um sich ernsthaft Gedanken über diese Hypothese zu machen. Und wie verhält es sich mit der Frage nach der historischen CO_2-Konzentration? Der »Klimaskeptiker« Beck stützt sich schlichtweg auf fehlerhafte Messungen.

Es wäre übrigens am besten, Sie vergäßen die Bezeichnung »Klimaskeptiker« gleich wieder. Denn Skepsis als wissenschaftliche Grundhaltung zeichnet die meisten dieser Klimadissidenten – oder wie auch immer man sie nennen möchte – nicht gerade aus. Zudem handelt es sich selten um echte Fachleute. Durkin ist Filmemacher und Beck Biologe. Zur Unkenntnis solcher Akteure kommt hinzu, dass sie gern diejenigen Teile der Wirklichkeit ausblenden, die nicht in ihr Weltbild passen. Die Auseinandersetzung mit ihnen strapaziert vor allem deshalb die Nerven, weil sie viele längst widerlegte Behauptungen unbeirrt stets von Neuem vorbringen.

Doch was vielleicht noch ärgerlicher ist: Der Konflikt mit den vermeintlichen Skeptikern täuscht darüber hinweg, dass es in der Klimadiskussion auch seriöse kritische Stimmen gibt. Wer die Unhaltbarkeit der Argumente von Durkin, Beck und Co. erkannt hat, tendiert leicht zum anderen Extrem: dem Glauben an ein katastrophales Klimaszenario. Daran aber zweifeln auch einige ernst zu nehmende Fachleute.

Hat die Intensität der Hurrikane zugenommen, oder scheint das nur so, weil die Wirbelstürme heute viel genauer beobachtet werden als früher? Diese Frage stellt der Hurrikanexperte Christopher Landsea. Der Mathematiker und Meteorologe Hans von Storch erwartet, dass sich die Menschheit an den bevorstehenden Klimawandel rechtzeitig anpassen kann, wenn sie nur will. Zudem halten einige Ökonomen – etwa Richard Tol – den »Stern Review«, in dem die wirtschaftlichen Folgen des Klimawandels analysiert werden, für übertrieben. Ohnehin sind viele Wissenschaftler wie der Ozeanphysiker Carl Wunsch der Ansicht, dass sich anhand der momentan verfügbaren Messdaten und Modelle noch keine verlässlichen Klimaprognosen für die kommenden Jahrzehnte abgeben lassen.

Der Politikwissenschaftler Roger Pielke jr. hat Experten wie Landsea, von Storch und Tol, die das Risiko einer vom Menschen verursachten globalen Erwärmung anerkennen, aber nicht mit katastrophalen Folgen rechnen, als »non-skeptic heretics« bezeichnet, als »nichtskeptische Ketzer«. Mit diesem Etikett versucht er gegen die vereinfachte Sicht anzugehen, wonach die Diskutanten in zwei Lager zerfallen – eine Mehrheit, die den Klimawandel für überwiegend anthropogen und extrem gefährlich hält, und eine Minderheit, die kategorisch an dieser Aussage zweifelt. Pielke erinnert daran, dass es auch ein paar Fachleute gibt, die zwischen den beiden Lagern stehen.

Die Debatte würde durch stärkeres Differenzieren sicher an Niveau gewinnen. Bedauerlich ist nur Pielkes Namenswahl. Denn mit der Bezeichnung »nichtskeptisch« unterstellt er den moderat kritischen Forschern das Fehlen jeder Skepsis, also der wissenschaftlichen Tugend par excellence. Das ist absurd, denn an begründeter Skepsis mangelt es seinen »Häretikern« zum Glück nicht. Darum haben sie auch tatsächlich etwas zu sagen.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und arbeitet als freier Journalist in Berlin.

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.

2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.

3. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.

4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.

5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.

6. Auf dieser Seite und unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon:	06221 9126-743
per Fax:	06221 9126-751
per E-Mail:	service@spektrum.com

oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

Abonnieren oder verschenken

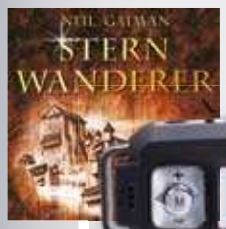
Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

Buch »Was macht das Licht wenn's dunkel ist?«
Hier beantworten Experten Fragen, die wir schon immer einmal stellen wollten.

Leser werben Leser

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Trekstor 1 GB MP3-Player
Der MP-3-Player speichert Ihre Lieblingslieder auf kleinstem Raum.



Diese Sonderedition beinhaltet weiterhin das Hörbuch zur Filmvorlage »Sternwanderer« von Neil Gaiman.

Produkt des Monats

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

ASTRONOMIE

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Schwarze Löcher als Super-Teilchenbeschleuniger

Aktive galaktische Kerne, wo große Mengen Materie in ein überschweres Schwarzes Loch fallen, sind die hellsten Objekte im Kosmos. Nun legen neue Beobachtungen nahe, dass sie auch die größten Teilchenbeschleuniger sind.

Von Ralph Engel und Fabian Schüssler

Seit Mitte des vorigen Jahrhunderts weiß man, dass es kosmische Teilchen gibt, die unvorstellbare Energien von mehr als 10^{20} Elektronenvolt haben. Das erste Exemplar wurde 1962 im US-Bundesstaat New Mexico mit Hilfe eines großen Detektorfelds entdeckt.

Die enormen Energiemengen lassen sich durch einen Vergleich mit dem Large Hadron Collider veranschaulichen, dem größten Beschleuniger der Welt, der momentan am Forschungszentrum Cern in Genf gebaut wird. Er hat einen Umfang von 27 Kilometern und ist mit supraleitenden Magneten modernster Bauweise ausgestattet. Um Teilchen auf Energien von 10^{20} Elektronenvolt zu bringen, müsste das Gerät allerdings die Größe der Umlaufbahn des Planeten Merkur haben. Deshalb verwundert es nicht, dass derart energiereiche Partikel eines der größten Rätsel der Astrophysik darstellen.

Aber nicht nur ihr Ursprung bereitet den Theoretikern Kopfzerbrechen. Mysteriös ist auch, wie diese Teilchen es schaffen, überhaupt bis zur Erde zu gelangen. Eigentlich sollten sie immer wieder mit den Photonen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die den Kosmos als eine Art Nachleuchten des Urknalls erfüllt, zusammenstoßen und dabei sehr schnell abgebremst werden. Dieser Effekt heißt nach den Theoretikern, die ihn postuliert haben, Greisen-Zatsepin-Kuzmin(GZK)-Unterdrückung. Er sollte dazu führen, dass die Häufigkeit kosmischer Teilchen, die auf die Erde treffen, bei hohen Energien stark abfällt. Versuche, das Phänomen experimentell zu beobachten, ergaben in der Vergangenheit allerdings widersprüchliche Resultate.

In jedem Fall sind kosmische Teilchen mit Energien über 10^{20} Elektronenvolt extrem selten. Abschätzungen zufolge dürfte auf einer Fläche von einem Quadratkilometer weniger als eines pro Jahrhundert niedergehen. Deshalb braucht man riesige Detektoranlagen, um diese Partikel nachzuweisen.

Dabei macht man sich einen Effekt zu Nutze, den der französische Physiker Pierre Auger 1938 erstmals beobachtete. Beim Eindringen in die Erdatmosphäre erzeugt ein hochenergetisches kosmisches Teilchen eine Kaskade von rund hundert Milliarden »Sekundärteilchen«. Ein Teil dieses so genannten Luftschauers erreicht die Erdoberfläche und lässt sich dort mit speziellen Detektoren nachweisen.

Extrem energiereiche Teilchen aus dem All erzeugen beim Eintritt in die Erdatmosphäre Kaskaden von Elektronen. Zu deren Nachweis dienen Tanks, die mit hochreinem Wasser gefüllt sind (Vordergrund). Darin rufen die Elektronen so genannte Tscherenkow-Lichtblitze hervor. Außerdem verursachen sie bei der Wechselwirkung mit Luftstickstoff ein schwaches ultraviolettes Leuchten, das sich mit Fluoreszenzteleskopen (rechts im Hintergrund) beobachten lässt.

RALPH ENGEL

In der argentinischen Pampa in der Nähe der Kleinstadt Malargüe entsteht seit 1998 das größte Feld aus solchen Detektoren. Es handelt sich um das südliche Observatorium des Pierre-Auger-Projekts. Eine internationale Kollaboration von mehr als 300 Physikern und Ingenieuren ist an seinem Aufbau beteiligt. Als Detektoren dienen Tanks, die mit zwölf Tonnen hochreinem Wasser gefüllt sind. Darin lösen die Sekundärteilchen so genannte Tscherenkow-Lichtblitze aus.

Vor zwei Jahren wurde die Errichtung des tausendsten Detektors gefeiert – am Ende sollen es 1600 sein. Da die Teilchenkaskaden typischerweise Durchmesser von mehr als fünf Kilometern aufweisen, genügt es, die Tanks mit einem Abstand von 1,5 Kilometern aufzustellen. Dadurch lässt sich schließlich eine Fläche von 3000 Quadratkilometern (vergleichbar mit der Größe des Saarlands) für den Nachweis nutzen.

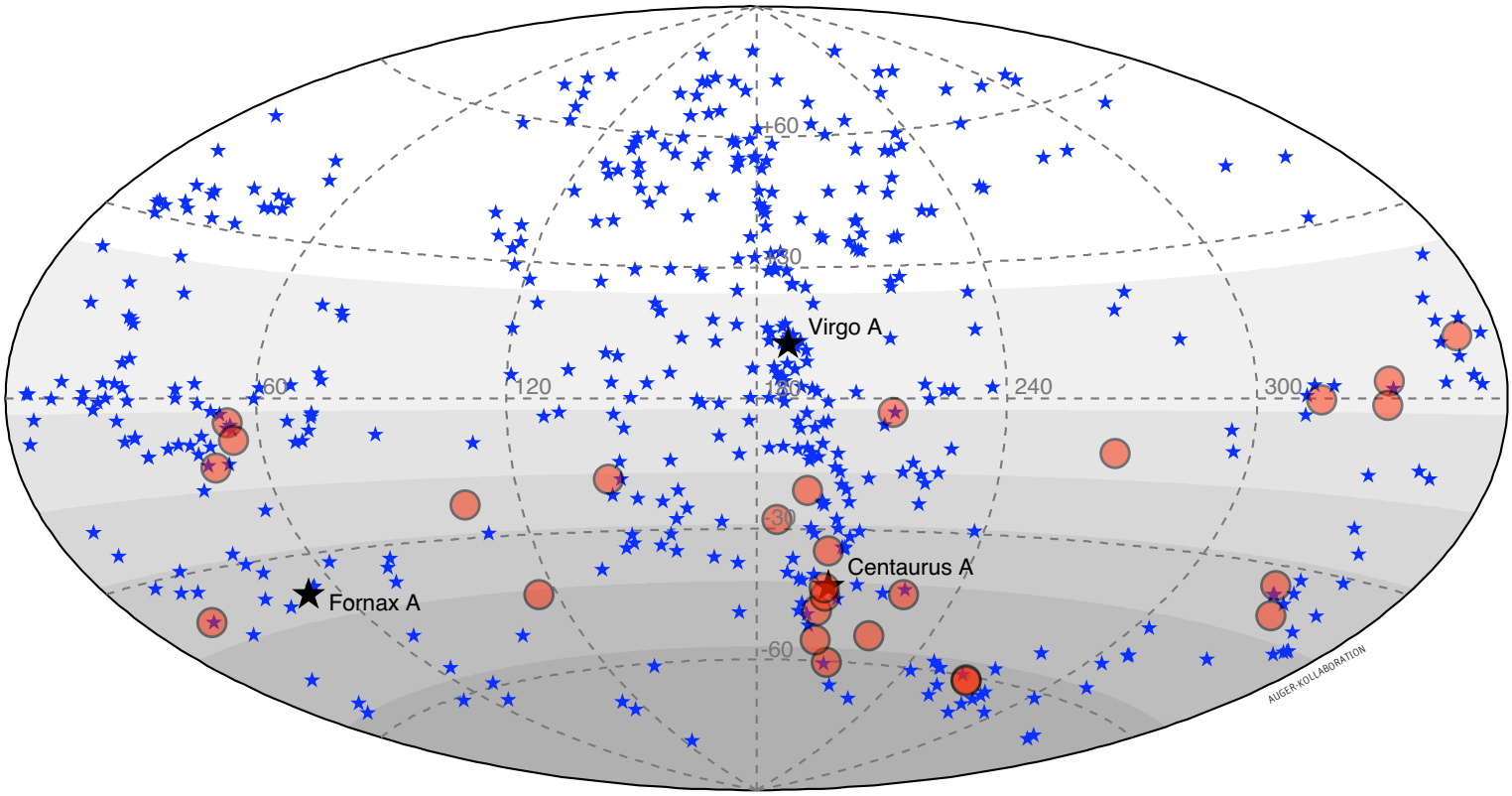
Außer den Tanks dienen erstmals auch Fluoreszenzteleskope zur Detektion der Luftschauer. 24 an der Zahl, registrieren sie das schwache ultraviolette Aufleuchten der Stickstoffmoleküle in der Atmosphäre, wenn diese von Sekundärteilchen getroffen werden. Allerdings können sie nur in dunklen Nächten arbeiten, da das Lichtsignal eines Luftschauers kaum heller als eine kurz aufblitzende 30-Watt-Glühlampe ist. Durch die Kombination von Teilchendetektoren und Fluoreszenzteleskopen gelingt es, nicht nur die Energie der kosmischen Partikel, sondern auch die Richtung, aus der sie kommen, genauer als bei früheren Experimenten zu bestimmen.

Noch vor der Fertigstellung des südlichen Pierre-Auger-Observatoriums ist die Suche nach den höchstenergetischen Teilchen bereits angelaufen. Die Detektoren haben bisher mehr als eine Million Luftschauer registriert. Und die Analyse dieser Daten förderte schon überraschende Erkenntnisse zu Tage, die das Rätsel um die Herkunft der höchstenergetischen kosmischen Strahlung einer Lösung näherbringen.

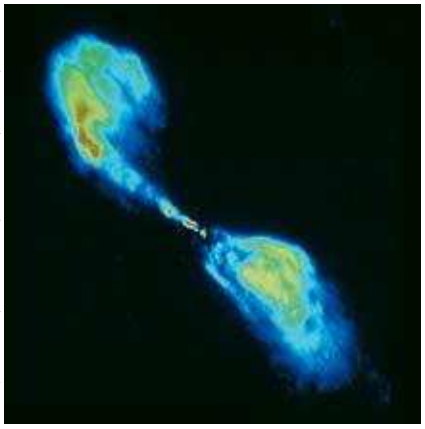
Zunächst einmal gelang es, die GZK-Unterdrückung zweifelsfrei nachzuweisen. Die 27 Teilchen mit extrem hoher Energie, die trotzdem beobachtet wurden, müssen deshalb aus unserer kosmischen Nachbarschaft stammen: aus einem Umkreis von höchstens 200 Millionen Lichtjahren. Sonst wären sie auf ihrem Weg zur Erde durch Wechselwirkung mit der Hintergrundstrahlung zu stark abgebremst worden.

Boten von Schwarzen Löchern

Für Begeisterung unter den Forschern sorgte aber vor allem die Richtung, aus der die extrem energiereichen Teilchen kamen. Bei zwanzig von ihnen zeigte der Einfallsvektor mit einer Abweichung von weniger als drei Grad auf aktive galaktische Kerne unseres lokalen Universums, in denen die Astronomen gigantische Schwarze Löcher vermuten (siehe S. 34). Besonders viele Partikel kamen aus Richtung von »Centaurus A«, der dichtesten starken Radiogalaxie des südlichen Sternhimmels. 14 Millionen Lichtjahre entfernt, beherbergt sie ein Schwarzes Loch von mehr als 200 Millionen Sonnenmassen. Damit gibt es erstmals Hinweise darauf, dass aktive galaktische Kerne die leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger



Auf dieser Himmelskarte sind die bekannten aktiven galaktischen Kerne in der Umgebung unserer Galaxie als blaue Sterne eingetragen. Die roten Punkte markieren die Ankunftsrichtungen der extrem energiereichen kosmischen Teilchen, die mit dem südlichen Pierre-Auger-Observatorium nachgewiesen wurden. Dessen Beobachtungsbereich ist grau eingezeichnet.



LINKS: NOAO;
RECHTS: JACK O. BURNS (UNIV. OF MISSOURI) & DAVID CLARKE (SMU CANADA)

Viele höchstenergetische kosmische Teilchen kommen offenbar von der Radiogalaxie Centaurus A. Gezeigt ist ein optisches Bild (links) zusammen mit einer Aufnahme im Radiobereich (rechts), in der zwei Plasmastrahlen senkrecht zur galaktischen Ebene erscheinen. Sie werden von der ins Schwarze Loch fallenden Materie erzeugt.

des Universums sind – obwohl der genaue Mechanismus noch unklar ist.

Diese Vermutung wird auch nicht durch die sieben Teilchen widerlegt, für die sich kein solcher Galaxienkern als Quelle identifizieren ließ. Die meisten von ihnen kamen nämlich aus der Richtung der galaktischen Ebene. Diese dicht bevölkerte Region trübt aber den Blick auf Objekte dahinter und erschwert damit die Beobachtung Schwarzer Löcher, die dort womöglich vorkommen.

Der indirekte Nachweis der höchstenergetischen Teilchen über ihre Sekundärprodukte beim Einschlag in der Atmosphäre hat allerdings einen Nachteil: Er verrät nichts über ihre Identität. Da aber eine so enge Korrelation zwischen ihrer Ankunftsrichtung und ihrem mutmaßlichen Ursprungsort in aktiven galaktischen Kernen gefunden wurde, können sie auf dem Weg zur Erde durch die Magnetfelder unserer Galaxie nur wenig abgelenkt worden sein. Demnach handelt es sich vermutlich um Protonen, also Wasserstoffkerne. Damit aber eröffnet sich nun umgekehrt die Möglichkeit, die geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung auch zur Messung der Magnetfelder in der Milchstraße zu nutzen.

Nach der Fertigstellung des südlichen Auger-Observatoriums wollen die Forscher mit dem Bau eines Gegenstücks auf der Nordhalbkugel beginnen, um alle Himmelsrichtungen beobachten zu können. Es soll im US-Bundesstaat Colorado stehen. Die nun vorliegenden ersten Ergebnisse steigern die Spannung, mit der die Forscher den Messungen auf der Nordhalbkugel entgegensehen; denn dort steht mit »Virgo A« die stärkste Radiogalaxie am Himmel.

Ralph Engel und **Fabian Schüssler** sind Astroteilchen-Physiker am Forschungszentrum Karlsruhe, die im Rahmen des Pierre-Auger-Projekts die Eigenschaften hochenergetischer kosmischer Strahlung untersuchen.

ANZEIGE

Konzentrierter.
Belastbarer.
Ausgeglichener.

Aktivieren Sie Ihre Kraftwerke der Konzentration.
Konzentration ist Ihre Eintrittskarte zu geistiger Fitness – und die können Sie stärken und zur Höchstform bringen. Ihr Gehirn hat das Potenzial, ein Leben lang konzentriert und geistig aktiv zu sein. Die Energie dazu liefern Ihnen Ihre 100 Milliarden Gehirnzellen. Aktivieren Sie Ihre Gehirnzellen – mit Tebonin®.

Tebonin®
Mehr Energie für das Gehirn.
Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.

Tebonin® intens 120 mg Wirkstoff: Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (dementielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Hinweise: Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.** Stand: Juli 2007 T/07/07/1

Stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.

Ginkgo-Spezialextrakt EGb 761®
- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich

SCHWABE
Mit der Natur.
Für die Menschen.
Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel
www.tebonin.de

TIERISCHE INTELLIGENZ

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Mehr als Nachäffen

Ein Harvard-Psychologe hat nachgewiesen, dass Affen genau wie Menschen ihre Beobachtungen in den jeweiligen Kontext einordnen und vor diesem Hintergrund bewerten können.

Von Josephina Maier

Auf geistigem Gebiet, wo genau liegt da die Grenze zwischen Mensch und Affe? Mit der Antwort tun sich Wissenschaftler bis heute schwer. Dass wir unseren haarigen Verwandten auf einigen Feldern weit überlegen sind, versteht sich von selbst. Doch bei dem Versuch, die Unterschiede an bestimmten Fähigkeiten festzumachen, erweist sich oft, dass Affen viel mehr können, als wir ihnen zutrauen.

Das musste auch der Psychologe Justin Wood von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) feststellen, als er drei Arten von Primaten einen Schlussfolgerungstest absolvieren ließ *(Science, Bd. 317, S. 1402)*. Er orientierte sich dabei an einem Versuch, den György Gergely vom Psychologischen Institut der Ungarischen Akademie der Wissenschaften in Budapest 2002 durchgeführt hatte.

Damals beobachteten 14 Monate alte Kinder, wie ein Erwachsener einen Lichtschalter mit der Stirn betätigte. Die Knirpse machten es anschließend nur dann genauso umständlich, wenn das Vorbild bei der Demonstration die Hände frei hatte – anderenfalls werteten sie die Verwendung des Kopfs als Notbehelf und nahmen ihrerseits lieber die Finger. Gergely schloss daraus, dass Kleinkinder schon in diesem Alter die Handlungen ihrer Mitmenschen in einen Gesamtkontext stellen und interpretieren können.

Verfügen auch nichtmenschliche Primaten über diese Fähigkeit? Das wollte Wood herausfinden. Mit Liszt- und Rhesusaffen sowie Schimpansen testete er drei Spezies, die unterschiedlich eng mit dem Menschen verwandt sind.

Zunächst prüfte der Forscher, ob die Tiere überhaupt zwischen einer zufälligen und einer absichtlichen Bewegung unterscheiden können. Dazu benutzte er wie sein Kollege Gergely ein menschliches Vorbild, dem die Affen zusahen. Die Person berührte einen von zwei Futterbehältern entweder wie zufällig mit dem Handrücken oder fasste ihn in einer klar zielgerichteten Bewegung an. Danach mussten sich die Affen für eines der beiden Gefäße entscheiden. Bei allen drei Arten fiel die Wahl deutlich häufiger auf den Behälter, den der Mensch vor ihnen absichtlich angefasst hatte.

Im eigentlichen Versuch setzte Wood den Affen dann eine Person vor, die eines der beiden Futtergefäße statt mit den Fingern mit dem Ellbogen berührte. In der Hälfte der Fälle hielt der Mensch dabei einen Gegenstand in der betreffenden Hand. Nur unter diesen Umständen wählten die Primaten, wie sich zeigte, bevorzugt das mit dem Ellbogen berührte Gefäß. Offenbar betrachteten sie die ungewöhnliche Geste als Ersatz für das nicht mögliche Anfassen mit den Fingern – genau wie die Kleinkinder das Schalterdrücken mit der Stirn als Notbehelf erkannten, weil die Hände nicht frei waren. In den anderen Fällen hielten die Tiere die Berührung dagegen für zufällig und damit bedeutungslos. Demnach werteten alle drei Primatenarten die Handlung nur dann als zielgerichtet, wenn sie in den Gesamtkontext passte.

Affen ziehen logische Schlüsse

Das erstaunt umso mehr, als der Ellbogen den Tieren als Fingerersatz völlig fremd ist. Deshalb können die Affen auch nicht einfach frühere Erfahrungen aus ihrem normalen Umgang miteinander auf die Testsituation übertragen haben. In diesem Punkt hebt sich Woods Studie von einem etwas älteren Versuch ab, der auf den ersten Blick sehr ähnlich wirkt. Zu Beginn dieses Jahres hatten Forscher um Friederike Wange von der Universität Wien einige Collies einen dressierten Hund beobachten lassen, der mit seiner Pfote eine Schaukel niederdrückte und so an Futter gelangte. Seine Artgenossen benutzten daraufhin ebenfalls ihre Pfote statt der Schnauze, die sie für eine solche

JUSTIN WOOD, HARVARD UNIVERSITY

Ein Wissenschaftler fasst gegenüber einem Makaken (nicht sichtbar) mit einer deutlichen Geste eine Koskosnusshälfte an. Affen können solche absichtlichen Handlungen von rein zufälligen Berührungen unterscheiden und ihre Bedeutung erkennen.

Aufgabe normalerweise nehmen würden. Hatte das Vorbild allerdings einen Ball im Maul, sodass es die Schaukel nicht damit niederdrücken konnte, ignorierten die Collies sein Beispiel und wählten die gewohnte Methode.

Intelligentes Imitieren ist also nicht Primaten vorbehalten. Die Leistung der Affen im Experiment von Wood geht aber noch einen Schritt darüber hinaus. Die Tiere hatten keinen Artgenossen, sondern einen Menschen vor sich. Außerdem konnten sie eine ihnen völlig fremde Bewegung richtig deuten und in den Kontext einordnen. Das lässt vermuten, dass unsere engsten Verwandten im Tierreich ebenso wie wir zum Ziehen logischer Schlüsse aus komplexen Sachverhalten fähig sind. Damit wäre eine weitere Bastion des vermeintlich exklusiv Menschlichen gefallen.

Woods Ergebnisse ergänzen auch neurologische Befunde zum Sich-Einfühlen in die Handlungen anderer. Demnach feuern bestimmte Nervenzellen – die so genannten Spiegelneurone – im prämotorischen Kortex von Primaten nicht nur beim Ausführen einer Bewegung, sondern auch dann, wenn diese bloß bei anderen beobachtet wird. Manche Forscher schließen daraus, dass ein Mensch oder Affe, um die Aktionen seines Gegenübers zu verstehen, die zugehörigen Bewegungen im eigenen motorischen System probeweise nachvollzieht. Wood glaubt aber, dass sich die Ergebnisse seines Experiments damit allein nicht erklären lassen; denn gleich ob die Hand einen Gegenstand trägt oder nicht, die Ellbogenbewegung bleibt dieselbe. Seiner Ansicht nach muss daher ein ergänzendes System existieren, das weitere Informationen einbezieht.

Ob die Fähigkeit von Affen, Beobachtungen im Kontext zu bewerten, nicht nur mit derjenigen von Kleinkindern, sondern auch von erwachsenen Menschen mithalten kann, bleibt nach Woods Experiment aber fraglich. Alle drei Primatenarten hatten bei dem Ellbogenversuch nicht beachtet, dass ihr menschliches Vorbild auch seine zweite Hand zum Berühren des Futtergefäßes hätte benutzen können. Ob diese nun hinter dem Rücken versteckt oder ganz offensichtlich unbeschäftigt war – die Affen nahmen keine Notiz davon.

Josephina Maier ist freie Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

Springers Einwürfe

Seid gut zu Fliegen!

Insekten haben ein empfindsames Gemüt.

Der eine liebt Katzen, der andere Hunde, ein dritter mag Kanarienvögel, ein vierter schaut gern den Fischen in seinem Aquarium zu. Umgekehrt weiß jeder ein Tier, vor dem es ihn am meisten ekelt. Sind es für Sie Schlangen, Mäuse oder Ratten? Mir bereiten Insekten größtes Unbehagen, gerade weil ich für ihre oft überraschende Beweglichkeit und Energie besonderen Respekt empfinde.

Damit stehe ich nicht allein da. Franz Kafkas Erzählung »Die Verwandlung« wie auch die mehrfach verfilmte Kurzgeschichte »Die Fliege« von George Langelaan erzielen ihren Gruseleffekt, indem sie ein menschliches Bewusstsein in den Leib eines Käfers beziehungsweise einer Stubenfliege sperren.

Mein starkes Unbehagen lässt sich wohl mit der großen evolutionären Distanz zwischen Mensch und Insekt erklären. Katzen sind verspielt, Hunde treu, Vögel singen – sie alle ähneln uns nicht nur in ihrem Körperbau, sondern stehen uns auch emotional nahe. Hingegen sind mir Insekten und andere Krabbeltiere bisher nur wie kleine, ungeheuer raffiniert gebaute Automaten erschienen, gegen die ich ohne Bedenken mit Fliegenklatsche oder Schuhsohle vorging. Doch seit ich einen Artikel über das mutmaßliche Innenleben der Taufliege *Drosophila* gelesen habe, sehe ich derlei »Ungeziefer« mit anderen Augen.

In den 1960er Jahren begann sich das Forschungsfeld der Neurogenetik zu etablieren; sie untersucht Zusammenhänge zwischen Erbgut und Verhalten – vor allem am Modell der Taufliege *(Nature, Bd. 450, S. 193)*. Bestimmte Mutationen verändern nur den Körperbauplan und lassen beispielsweise aus dem Kopf statt Fühlern Beine wachsen, doch andere führen zu drastisch verändertem Verhalten. So gibt es *Drosophila*-Mutanten, die an Schlaflosigkeit leiden; andere haben den Sinn für gewisse Gerüche eingebüßt oder fühlen sich zum gleichen Geschlecht hingezogen. Neuerdings untersuchen Neurogenetiker an mutierten Taufliegen, welche Komponenten in deren winzigem Gehirn ausfallen, die normalerweise für Lernen, Gedächtnis oder visuelle Mustererkennung zuständig sind.

Sogar erbliche Charakterunterschiede lassen sich bei Fliegen feststellen. Manche sind tollkühn, andere feige, wenn sie im Labor über einen schmalen Abgrund klettern sollen. Auch Aggressivität, soziales Verhalten und Balzrituale erweisen sich als individuell verschieden. Das wirft die Frage auf, ob wir der einzelnen Fliege nicht etwas wie Persönlichkeit und Emotionalität zubilligen müssen. Im erwähnten Nature-Artikel wird ein Forschungsprogramm skizziert, das die Suche nach komplexen Charakterzügen wie Geselligkeit, Altruismus, Einfühlung, Frustration, Hass, Eifersucht und Unterordnung bei *Drosophila* zum Ziel hat.

Das mutet nur auf den ersten Blick überzogen an: Auf den zweiten erinnert es uns daran, dass Fliegen Verwandte sind, wenn auch weit entfernte. Gewiss haben sich unsere Stammbaumlinien vor Hunderten von Millionen Jahren getrennt, aber der Mensch teilt viel von seinem Erbgut mit *Drosophila*, und die so genannten Homöobox-Gene sorgen bei beiden für die Ausdifferenzierung von vorne und hinten, von Kopf und Körper, von Rumpf und Beinen. Erst diese ferne Verwandtschaft erklärt, warum die Sciencefiction-Idee einer Kreuzung von Mensch und Insekt etwas so gruselig Plausibles an sich hat.

Michael Springer

Als ich heute Frühstück machte, floh eine kleine Spinne aus meiner Saftpresse. Früher hätte ich sie in einem Anfall von Schreck und Ekel sofort zerquetscht, doch jetzt ließ ich sie laufen. Ein wenig kam ich mir dabei vor wie der hinduistische Bettelmönch, der unterwegs vor sich den Boden kehrt, damit er kein Insekt zertritt, denn »Tat twam asi«: Auch das bist du.

Am Rande des CHAOS

Die Zahl der Planeten, die einen Stern umkreisen, ist kein Zufall. Unser Sonnensystem beispielsweise könnte früher zwar mehr Planeten besessen haben. Dann aber katapultierte es den einen oder anderen ins Weltall, um seine eigene Stabilität zu bewahren. Beobachtungen extrasolarer Planetensysteme helfen jetzt, diese Hypothese zu erhärten.

In Kürze

- **Die Himmelskörper** im Planetensystem unterliegen gegenseitigen gravitativen Wechselwirkungen, die sich aufschaukeln können. Solche Resonanzen können vor allem kleinere Objekte aus ihrer Bahn schleudern.
- **Die Bahnen der großen Planeten** sind stabil. Merkur und Venus allerdings könnten einst infolge von Resonanzen kollidieren. Daraus schlossen Forscher, dass Planetensysteme sich stets am Rand zur Instabilität befinden. Ihre langfristige Stabilität bewahren sie, indem sie im Lauf der Zeit einzelne Planeten aus dem System werfen oder ihre Zahl durch Kollisionen verringern.
- Anhand neuer Beobachtungen von **Exoplanetensystemen** um fremde Sterne lässt sich diese Hypothese überprüfen. Auch diese scheinen bis an den Rand ihrer Kapazität mit Planeten gefüllt zu sein.

Von Steven Soter

Die gleiche Schwerkraft, die Äpfel von den Bäumen fallen lässt, hält auch die Planeten auf ihren Bahnen. Isaac Newtons Erkenntnis, die er in seinen im Jahr 1686 fertig gestellten »Principia Mathematica« formulierte, bereitete dem Naturforscher aber auch Sorgen. Müssten sich die schwachen Schwerkräfte zwischen benachbarten Planeten nicht aufsummieren, sodass die Exzentrizitäten der Umlaufbahnen – deren Abweichung von der Kreisform – beständig zunähmen? Zusammenstöße zwischen den Planeten und schließlich die Zerstörung des Sonnensystems wären unvermeidlich. Da dies nicht geschah, glaubte Newton, dass Gott selbst hin und wieder eingriff, um die Bahnen der Planeten zu korrigieren und so für einen reibungslosen Ablauf am Himmel sorgte.

Um 1800 jedoch kam Pierre-Simon Laplace auf mathematischem Weg zu dem Schluss, dass sich das Sonnensystem selbst stabilisiert. Die gravitativen Wechselwirkungen führten nämlich, so der Mathematiker und Philosoph, nur zu kleinen Oszillationen der Bahnexzentrizitäten um ihre Mittelwerte herum. Warum Gott in seinem Hauptwerk über Himmelsmechanik nicht mehr vorkomme, fragte ihn daraufhin sein Freund Napoleon Bonaparte. »Dieser Hypothese, Sire«, soll er geantwortet haben, »bedurfte ich nicht!« Laplace war zudem überzeugt, dass sich der künftige Aufenthaltsort jedes Objekts im Sonnensystem aus den Bewegungsgesetzen exakt vorausberechnen lasse, wenn nur die Positionen und Impulse aller Himmelskörper zu einem bestimmten Zeitpunkt genau genug bekannt seien.

Dann aber bewies Henri Poincaré im späten 19. Jahrhundert, dass Laplace einige seiner Gleichungen zu sehr vereinfacht hatte. Er hatte Terme wegfallen lassen, die er als überflüssig ansah – die es aber keineswegs waren. Dadurch übersah Laplace, dass es im Sonnensystem zu chaotischen Bewegungen kommen kann. Tatsächlich wirken die Planeten bisweilen so aufeinander ein, dass schon kleinste Veränderungen der Anfangsorte zu einem völlig anderen Endzustand des Systems führen. Ein solches System bezeichnen Mathematiker und Physiker als chaotisch und man kann ihm nur mit modernen Hochgeschwindigkeitsrechnern zu Leibe rücken. Tatsächlich waren es Computer, die schließlich Belege dafür lieferten, dass das Sonnensystem insgesamt nur sehr geringe Stabilität aufweist. Laplace war widerlegt: Die Bewegungen der Himmelskörper sind über lange Zeiträume hinweg grundsätzlich nicht exakt vorhersagbar.

Kaum noch Platz im System

Heute simulieren Theoretiker die Entstehung von Planetensystemen auf immer leistungsstärkeren Rechnern, während astronomische Beobachter in schneller Folge neue Planetensysteme rund um fremde Sterne aufspüren. Die Faktenlage spricht dafür, dass Planetensysteme in der Regel bis fast an ihre Kapazitätsgrenzen mit Himmelskörpern »gefüllt« sind – (viel) mehr Planeten, so die verblüffende Fol-

Vor 4,6 Milliarden Jahren, noch bevor die Erde existierte, war die Sonne von einer Scheibe aus Gas und Staub umgeben (Illustration), aus der sich schließlich die acht Planeten unseres Sonnensystems bildeten. Aber warum gerade acht? Computersimulationen deuten darauf hin, dass es früher mehr waren. Dann aber warf das Sonnensystem, um seine Stabilität zu bewahren, einige davon hinaus ins All.

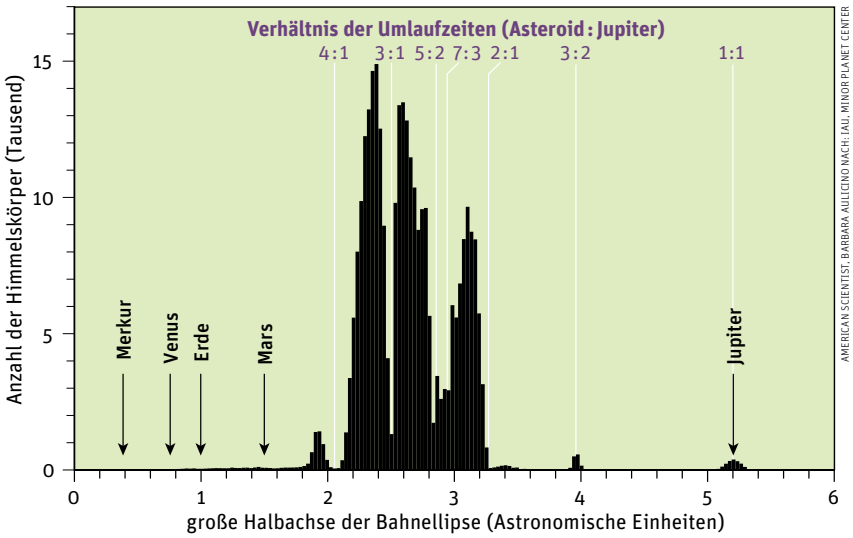
gerung, fänden darin gar keinen Platz. Die zahlreichen Beobachtungsdaten werden uns nun helfen, das fragile Gleichgewicht zwischen Ordnung und Chaos in Planetensystemen besser zu verstehen. Die Zeiten Laplaces, in denen das Sonnensystem als Musterbeispiel für uhrwerkhafte Stabilität galt, sind jedenfalls vorbei.

Den ersten fundierten Beleg für Instabilitäten im Sonnensystem entdeckte der amerikanische Astronom Daniel Kirkwood im Jahr 1866, als er den Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter untersuchte. Zu jener Zeit waren erst rund 90 Asteroiden bekannt, während heutige Kataloge die Bahnen von über 150 000 Exemplaren auflisten. Trotz der dürftigen Daten fand Kirkwood auffällige Lücken in der Verteilung der Zeiten, die Asteroiden für einen Umlauf um die Sonne brauchen. (Entsprechende Lücken wies auch die Verteilung der Bahndurchmesser auf, denn beide Größen hängen auf wohl definierte Weise miteinander zusammen.) So besaß keines der Objekte eine Umlaufdauer von etwa 3,9 Jahren. Dies entspricht, bemerkte Kirkwood, gerade einem Drittel der Umlaufdauer von Jupiter.

Das ist kein Zufall. Umkreist ein Asteroid unser Zentralgestirn exakt dreimal, während Jupiter genau einen Umlauf vollzieht, dann nähern sich beide Himmelskörper stets am gleichen Punkt ihrer Umlaufbahn am stärksten an. Dort erhält der Asteroid durch die Schwerkraft seines massereichen Nachbarn jedesmal einen kleinen Impuls. Mit der Zeit summieren oder schaukeln sich diese Störungen auf, sodass die Astronomen von einer 3:1-Resonanz der mittleren Bahnbewegung sprechen. Im Asteroidengürtel sind zudem weitere Lücken bekannt, die etwa durch die 5:2- oder 7:3-Resonanzen mit Jupiter entstehen.

Das Beispiel einer Kinderschaukel veranschaulicht, was dabei geschieht. Stößt man die Schaukel an zufällig ausgewählten, jeweils unterschiedlichen Orten ihrer Bahn an, so beeinflusst dies ihr Verhalten nicht allzu sehr. Stößt man sie aber immer dann an, wenn sie den höchsten Punkt ihrer Bahn erreicht, summieren sich die Stöße auf, die Schaukel schwingt höher und höher. Selbst wenn man sie nur jedes zweite oder dritte Mal am höchsten Punkt anstößt, verstärkt sich die Schwingung. Dann allerdings dauert das Aufschaukeln länger, die Resonanz ist schwächer.

Befindet sich ein Asteroid auf einer Umlaufbahn, auf der es zu Resonanzen kommt, kann seine Exzentrizität daher so weit anwachsen, dass er schließlich in die Sonne stürzt oder mit einem Planeten kollidiert. Möglich ist auch, dass er so nahe an einem Planeten vorüberzieht, dass ihn dessen Anziehungskraft in eine andere Region des Sonnensystems schleudert. Selbst Asteroiden auf stabilen Umlaufbahnen werden mitunter in eine der Kirkwood-Lücken gestoßen. Hier bekommen sie es dann mit Jupiter zu tun und werden aus dem Asteroidengürtel hinausgeschleudert. Viele der Meteoriten, die auf die Erde treffen, sind ebenfalls Bruchstücke aus dem Gürtel, die sich in eine der Resonanzlücken verirrt hatten. Die Riesenplaneten zerren aber auch an den kleinen Eiswelten, die den jenseits der



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA ALLICINO NACH: IAU, MINOR PLANET CENTER

Deutliche Lücken durch Resonanzeffekte veranschaulicht dieses Diagramm. Die waagerechte Achse zeigt die Entfernung der untersuchten Asteroiden von der Sonne (genauer: die Länge der großen Halbachse der Bahnellipse), gemessen in Astronomischen Einheiten (1 AE entspricht der mittleren Entfernung zwischen Erde und Sonne). In der Senkrechten ist die Zahl der in der jeweiligen Entfernung bekannten Asteroiden aufgetragen. Destabilisierende Resonanzen führen zu Minima in der Verteilung (Kirkwood-Lücken). Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter wird durch 4 : 1- und 2 : 1-Resonanzen mit Jupiter eingegrenzt. Auch stabile Resonanzen existieren, etwa die 3 : 2- (Hilda-Asteroiden) und 1 : 1-Resonanz (Jupiter-Trojaner).

Will man **säkulare Resonanzen** in Planetensysteme um fremde Sterne untersuchen, muss auch ein weiterer Effekt berücksichtigt werden. Die Auswirkungen der Raumzeitkrümmung können nämlich ähnlich groß wie die der Resonanz werden. Dies haben Fred C. Adams von der Universität Michigan und Gregory Laughlin von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz jüngst am Beispiel der Sterne Ypsilon Andromedae und HD160691 nachgewiesen. Deren Planeten sind näher an ihrem Zentralgestirn als die Erde an der Sonne und der Gravitation ihrer Sterne daher besonders stark ausgesetzt.

Neptunbahn liegenden Kuipergürtel bevölkern. So sorgen sie für Nachschub an kurzperiodischen Kometen, wie sie regelmäßig auch ins innere Sonnensystem vordringen. Doch auch schon im jungen Sonnensystem übten sie Einfluss aus: Damals füllten kleine Eiskörper, die zu eng an den wachsenden Riesen vorbeiflogen, die Oortsche Wolke (die der Sonne noch ferner ist als der Kuipergürtel) mit vielen hundert Milliarden Kometenkernen.

Die folgenreichen Begegnungen veränderten sogar die Umlaufbahnen der großen Planeten. Weil die wachsenden Planeten Saturn, Uranus und Neptun mehr kleine Körper nach innen in Richtung Jupiter schleuderten als nach außen, wanderten sie selbst auf Grund der Drehimpulserhaltung nach außen. Bei Jupiter war das Gegenteil der Fall: Der sehr massereiche Planet schleuderte die meisten kleinen Körper in das äußere Sonnensystem oder sogar noch weiter hinaus, weshalb er selbst nach innen wanderte.

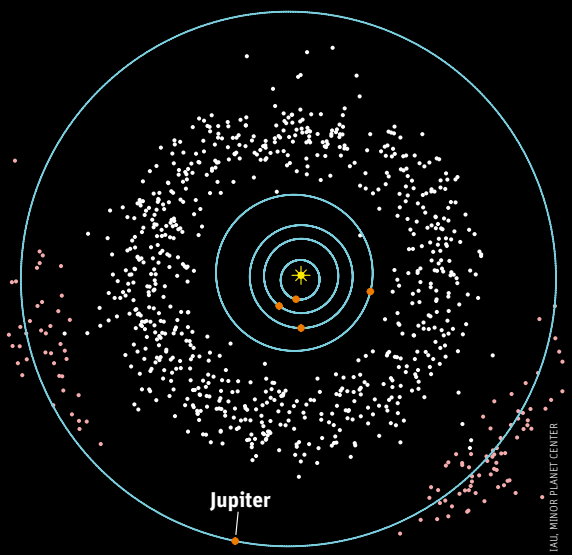
Doch zurück zu den resonanten Umlaufbahnen. Meist sind sie hochgradig instabil, aber es gibt einige Ausnahmen. Dafür verantwortlich sind kleine Unterschiede in der Konfiguration der beteiligten Himmelskörper. Viele Objekte im Kuipergürtel sind in einer stabilen 2 : 3-Resonanz mit Neptun gefangen. Sie umkreisen die Sonne also zweimal, während der Planet drei Umläufe vollzieht. Nach Pluto, dem ersten entdeckten Objekt dieser Art, werden sie Plutinos genannt. Die Bahnen einiger dieser Plutinos und auch die Bahn von Pluto selbst kreuzen sogar die Neptunbahn. Die Geometrie ihrer Resonanzbahn verhindert aber, dass sie dem Planeten zu nahe kommen, und sichert so ihr Überleben.

Ein weiteres Beispiel für recht stabile Umlaufbahnen stellen die Trojaner dar. Diese Schar Tausender von Asteroiden bewegt sich auf derselben Bahn wie Jupiter um die Sonne. Manche laufen ihm voraus, andere hinterher, in einem Abstand von jeweils 60 Grad. Weil solche »koorbitalen« Objekte die gleiche Umlaufdauer wie der Planet selbst haben, sind die Trojaner in einer 1 : 1-Resonanz gefangen. Auch in diesem Fall bleiben nahe Vorbeiflüge an Jupiter aus, die Trojaner sind also ungefährdet. Ähnliche Asteroidenfamilien begleiten auch

Der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter enthält unzählige felsige Himmelskörper (weiße Punkte). Die Trojaner (rosa) außerhalb des Asteroidengürtels sind auf ihren Bahnen sicher, weil sie in einer 1 : 1-Resonanz mit Jupiter gefangen sind. Eingezeichnet sind nur Asteroiden mit einer Größe von über 50 Kilometer. Die meisten dieser Himmelskörper sehen vermutlich aus wie Eros. Der Asteroid ist mit seinen 33 Kilometern Längsdurchmesser viel zu klein, als dass ihn seine eigene Schwerkraft in Kugelform bringen könnte.

NASA / JHUA PL

Eros



IAU, MINOR PLANET CENTER

die Planeten Mars und Neptun um die Sonne. Die gegenseitige Anziehung der Planeten führt auch zu zyklischen Prozessen, bei denen sich die räumliche Orientierung ihrer Umlaufbahnen ändert. Es kommt zu einem Effekt analog der Präzession der Rotationsachse unserer Erde, zudem rotiert die Hauptachse der Ellipse innerhalb der Ebene der Umlaufbahn. Dies führt zu säkularen, also langfristigen Resonanzen, denn die Drehung der Orientierung einer elliptischen Bahn dauert um ein Vielfaches länger als die Umlaufzeit. Säkulare Resonanzen wiederum können starke Störungen der Bahnen kleinerer Himmelskörper bewirken. Das Sonnensystem ist also eine tückische Region: Auf einer Unzahl möglicher Bahnen wären Himmelskörper säkularen Resonanzen oder Resonanzen der mittleren Bahnbewegung ausgesetzt. Besonders störungsanfällig können zudem Bahnen sein, auf denen sich Resonanzorbits überlappen.

Erde auf stark elliptischen Abwegen?

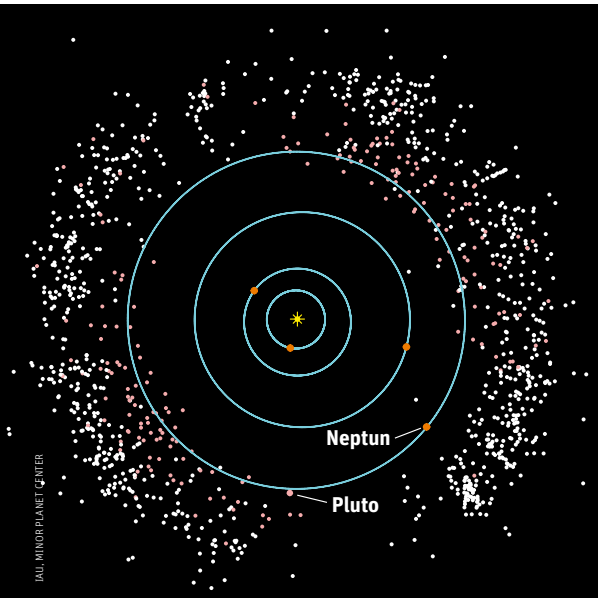
Obwohl das Sonnensystem einen so geordneten Eindruck macht, enthält es doch viele chaotische Elemente. Eine grundlegende Eigenschaft des mathematischen Chaos ist die extreme Abhängigkeit eines Systems von seinen Anfangsbedingungen. Schon eine scheinbar unbedeutende winzige Störung kann zu wesentlichen Änderungen seiner großräumigen Konfiguration zu einem späteren Zeitpunkt führen. Ein vertrautes Beispiel ist das Billardspiel: Mikroskopische Änderungen in der Bahn einer Billardkugel können, insbesondere nach vielen Kollisionen, das ursprünglich beabsichtigte Ergebnis eines Stoßes völlig verändern. Deterministisch sind chaotische Systeme gleichwohl, sie folgen also präzise den Gesetzen der klassischen Physik. Weil aber die möglichen minimalen Störungen nicht präzise erfasst werden können, bleibt ihre Entwicklung grundsätzlich unvorhersagbar.

Erst in jüngerer Zeit gelang es Wissenschaftlern, chaotische Systeme mit Hilfe von Computern in hoher Auflösung zu simulieren und so besser zu verstehen. Die bislang umfangreichsten Rechnungen zur langfristigen Stabilität des Sonnensystems stammen von Jacques Laskar vom Bureau des Longitudes, einem astronomischen Institut in Paris. Laskar simulierte die gravitativen Wechselwirkungen zwischen den acht Planeten unseres Sonnensystems über einen Zeitraum von 25 Milliarden Jahren (das Sonnensystem ist nur fünf Milliarden Jahre alt). Dabei fand er heraus, dass die Exzentrizitäten und andere Parameter der Umlaufbahnen chaotische Veränderungen durchlaufen. Schon eine Prognose der Positionen, die die Planeten in nur 100 Millionen Jahren einnehmen, ist daher unmöglich.

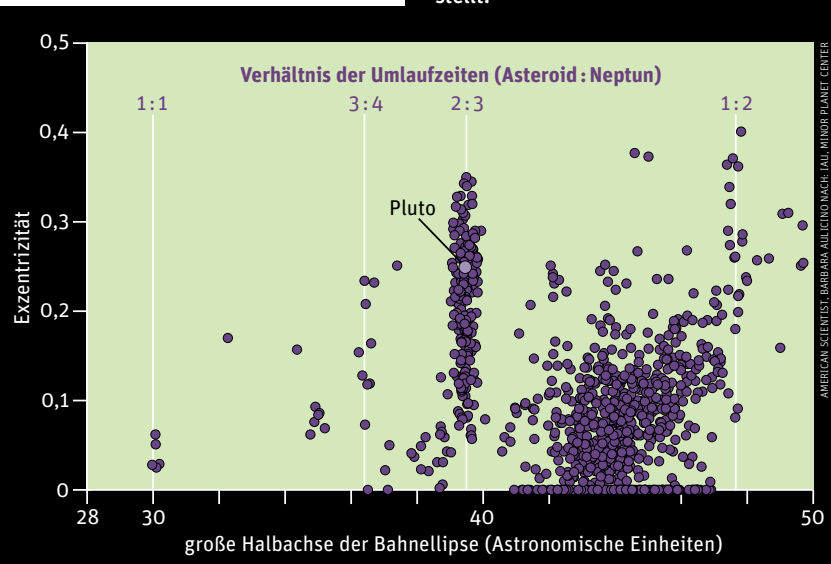
Könnte sich also auch die Erde eines Tages auf einer stark elliptischen Bahn wiederfinden? Dann würden sich auch unsere Lebensbedingungen ändern, weil ihre Abstände von der Sonne viel stärker variieren würden als heute. Oder könnte das Sonnensystem einst sogar einen Planeten verlieren? Nein. Denn auch für das Chaos gibt es physikalische Grenzen. Ein Beispiel dafür ist das ebenfalls chaotische System Wetter. Obwohl Meteorologen nicht voraussagen können, wie das Wetter in einem Monat sein wird, können sie doch mit großer Sicherheit einen Bereich angeben, in dem die Wetterbedingungen dann liegen werden. Denn externe Faktoren wie die Helligkeit der Sonne oder die Länge der Tage schränken die Spielräume des Systems Wetter ein.

Wie Laskar herausfand, sind die Umlaufbahnen der Planeten über Milliarden Jahre hinweg relativ stabil, obwohl das Chaos ihre Positionen beeinflusst. Einerseits ist also die Konfiguration der Planeten langfristig im Detail völlig unvorhersehbar, andererseits aber verändern sich die Umlaufbahnen nicht so stark, dass Kollisionen zwischen den Planeten

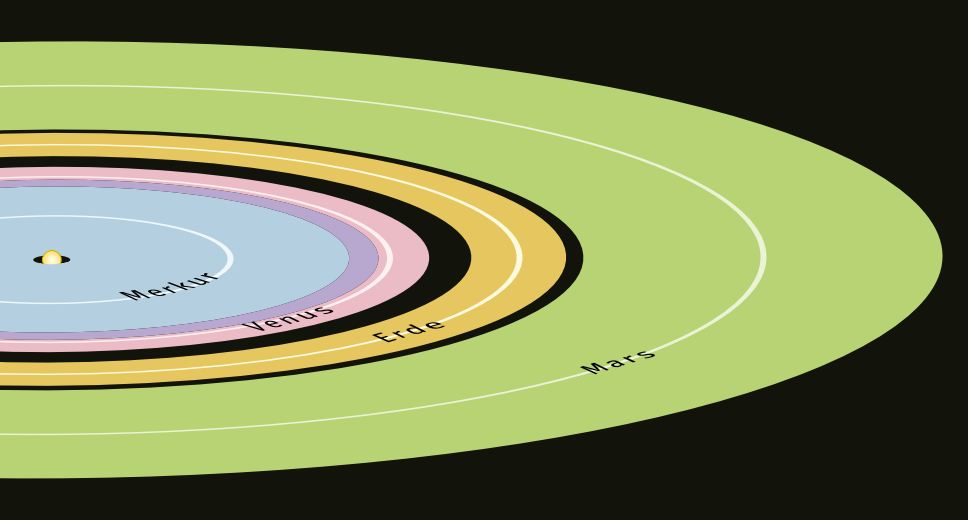
In der Verteilung kleiner Körper im äußeren Sonnensystem sind Bereiche stabiler Resonanzen deutlich zu erkennen (unten). In 30 Astronomischen Einheiten (AE) Entfernung sind die Trojaner von Neptun zu finden. Dann folgen in Entfernungen zwischen 40 und 50 AE die Kuipergürtel-Objekte, einschließlich Plutos und der nach ihm benannten Plutinos. Hinzu kommen Objekte, die in 3 : 4- und 1 : 2-Resonanzen mit Neptun gefangen sind. Das Bild links zeigt, dass sich die meisten Plutinos (rosa Punkte) und anderen Kuipergürtel-Objekte (weiß) jenseits der Neptunbahn befinden. Durchziehende Kometen und aus dem Kuipergürtel hinausgeworfene Objekte sind zu Zwecken der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.



IAU, MINOR PLANET CENTER



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA ANLICINO NACH: IAU, MINOR PLANET CENTER



STEPHANIE FREESE, NACH: JACQUES LASKAR, 1996

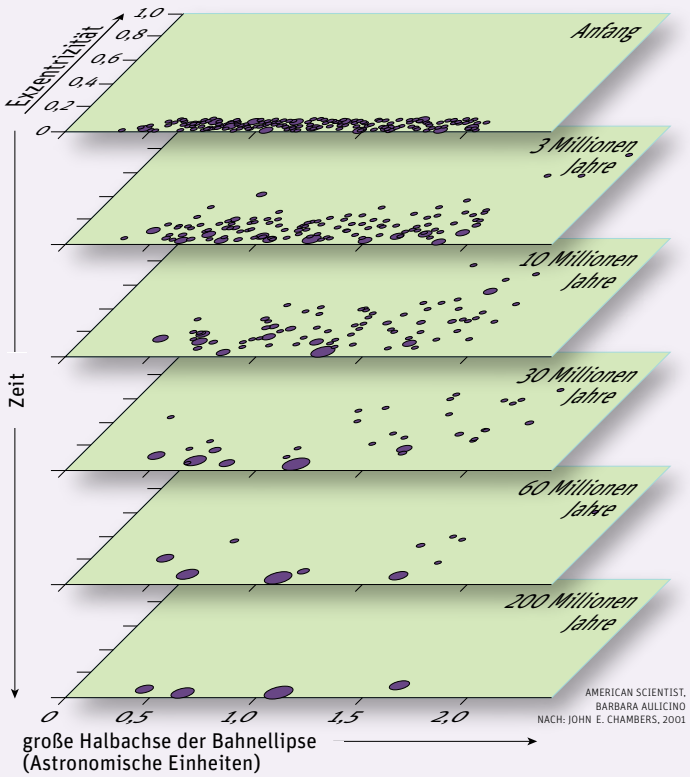
Die maximalen Exzentrizitäten der Bahnen der inneren Planeten verändern sich im Lauf der Zeit erheblich, wie numerische Simulationen von Jacques Laskar zeigen. Im Verlauf von Milliarden Jahren kann die Bahn eines Planeten daher innerhalb einer breiten (farbig eingezeichneten) Region verlaufen. Die weißen Linien markieren seine gemittelte Umlaufbahn. Für Merkur besteht sogar die Möglichkeit einer Kollision mit der Venus (violetter Bereich).

möglich wären. Beispielsweise sorgt die Erhaltung des Gesamtdrehimpulses im Planetensystem dafür, dass die Exzentrizitäten der Planetenbahnen bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten. Am stabilsten sind die Umlaufbahnen der äußeren Riesenplaneten. Die kleineren terrestrischen Planeten, insbesondere Mars und Merkur, werden heftiger umhergeworfen. Ihre Exzentrizitäten schwanken im Verlauf von Jahrmillionen ganz erheblich, wie die Simulationen zeigen. Diese Schwankungen sind einerseits groß genug, dass sie den zwischen ihren Bahnen liegenden Bereich von allen kleineren Körpern säubern, andererseits aber nicht so groß, dass sie zusammenstoßen könnten. Eine mögliche Ausnahme fand Laskar allerdings: Für Merkur, den masseärmsten Planeten, errechnete er eine immerhin kleine Wahrscheinlichkeit, dass dieser in einigen Milliarden Jahren mit der Venus kollidiert. Das Sonnensystem, schloss Laskar, befindet sich genau an der Grenze zur Instabilität. Dieser Gedanke wiederum führte ihn zu der Idee, dass das Sonnensystem »dynamisch voll« oder zumindest fast voll ist. Versuchte man, die vorhandenen Planeten um einen weiteren zu ergänzen, würden die gravitativen Störungen das System in Aufruhr versetzen. Erst nach einer Kollision käme es wieder zur Ruhe – oder nachdem es einen Planet hinausgeworfen hat.

Laskar vermutete, dass das Sonnensystem sich auch im Verlauf seiner Entwicklung stets genau an dieser Grenze befand. Dazu aber muss es nach und nach Objekte hinausgeworfen haben. Die Zeitskala, auf der dies stattfand, entsprach dabei jeweils seinem Alter: War es beispielsweise eine Milliarde Jahre alt, benötigte es etwa diesen Zeitraum, um ein großes Objekt hinauszuwerfen.

Mittlerweile ist es fünfmal älter, sodass es bis zu einem weiteren solchen Ereignis nun noch länger dauern wird. Im Sonnensystem könnte es vor Milliarden von Jahren folglich mehr Planeten gegeben haben als heute. Das Sonnensystem immunisierte sich also gegen ein Chaos auf großen Skalen, indem es die Zahl der Planeten allmählich verringerte und so die Abstände zwischen ihnen vergrößerte. Ihre gegenwärtige Zahl muss daher gerade so groß (und der Abstand zwischen ihnen so klein) sein, wie es ein Zustand langfristiger

Simulationen zeigen die Entwicklung der inneren Staub- und Gasscheibe um einen jungen Stern. Anfangs existieren dort zahlreiche Planetesimale auf fast kreisförmigen Umlaufbahnen (oben). Binnen weniger Millionen Jahre wachsen die Exzentrizitäten der meisten kleinen Körper stark an. Aus der Verschmelzung kleiner Objekte entstehen währenddessen Planetenembryos. Im Lauf der Zeit kollidieren kleinere Körper mit größeren oder werden aus dem System geschleudert. Zurück bleiben einige wenige Planeten mit niedriger Bahnexzentrizität (unten). Der Wert der Exzentrizität reicht von 0 (kreisförmig) bis 1 (parabelförmig).



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA AULICINO
NACH: JOHN E. CHAMBERS, 2001

Jedes Planetensystem ist anders (rechts): Planetesimale in einer Staub- und Gasscheibe um einen Stern können eine Vielzahl verschiedener Planetensysteme hervorbringen. In Simulationen müssen neben ihrer Anfangszahl und räumlichen Verteilung auch chaotische Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Grafik a stellt das äußere Sonnensystem dar. Zum Vergleich sind elf (äußere) Planetensysteme gezeigt, die alle aus derselben Simulation hervorgingen. Sie besitzen zwischen einem (b) und sieben (f) äußere Planeten unterschiedlichster Masse. Die Zahlen geben die jeweilige Planetenmasse als Vielfaches der Erdmasse an.

Stabilität erfordert. Ein solcher Prozess der dynamischen Relaxation ist nicht nur in Planetensystemen am Werk, sondern auch in Sternhaufen und ganzen Galaxien. Durch den Hinauswurf der am wenigsten stabilen Mitglieder nähern sich die Bahnen der zurückbleibenden Objekte aneinander an und ihre Exzentrizitäten nehmen ab.

Bemerkenswert leerer Raum

Computersimulationen mit »Testkörpern«, die in das virtuelle Planetensystem eingefügt werden, zeigen, dass die acht Planeten recht dominant sind. Nahezu überall im Sonnensystem stören sie die sich auf Kreisbahnen bewegenden Testkörper ganz erheblich. Schon innerhalb weniger Millionen Jahre kommt es jeweils zu nahen Begegnungen mit einem Planeten, infolge derer sie aus ihren Bahnen geschleudert werden. Offenbar gibt es aber auch zahlreiche Regionen, in denen sich Objekte erheblich länger aufhalten können. Eine dieser Regionen liegt zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter – es ist also kein Zufall, dass sich genau dort der Asteroidengürtel befindet.

Simulationen von Jack Lissauer und seine Kollegen am Ames Research Center der US-Weltraumbehörde Nasa und an der Queen's-Universität in der kanadischen Provinz Ontario belegen, dass ein erdgroßer Planet, wäre er denn dort entstanden, über Jahrmilliarden hinweg auf einer stabilen Bahn liefe. Allzu überraschend ist dieses Ergebnis natürlich nicht: Der Asteroidengürtel ist dicht bevölkert und muss aus diesem Grund relativ immun gegen Störungen sein. Andererseits zeigte dieselbe Untersuchung, dass die Bahn eines Riesenplaneten dort schnell instabil würde.

Abgesehen von weiteren Horten der Stabilität wie dem Kuipergürtel, der fern der Planeten liegt, und den Trojanern von Mars, Jupiter und Neptun ist der interplanetarische Raum aber bemerkenswert leer. Dies ist keine Nebensächlichkeit. Ein Planet muss sogar, so fordert es seit August die Neudefinition dieses Begriffs, seine orbitale Nachbarschaft von anderem Material befreit haben. Die meisten der kleinen Objekte, die ihre Bahnen zwischen den Planeten ziehen, sind denn auch nur vorübergehende Eindringlinge. Sie gelangten erst vor kurzer Zeit in die Nachbarschaft der Planeten und werden schon bald mit einem von ihnen kollidieren oder aber aber aus dem Sonnensystem hinausgeschleudert.

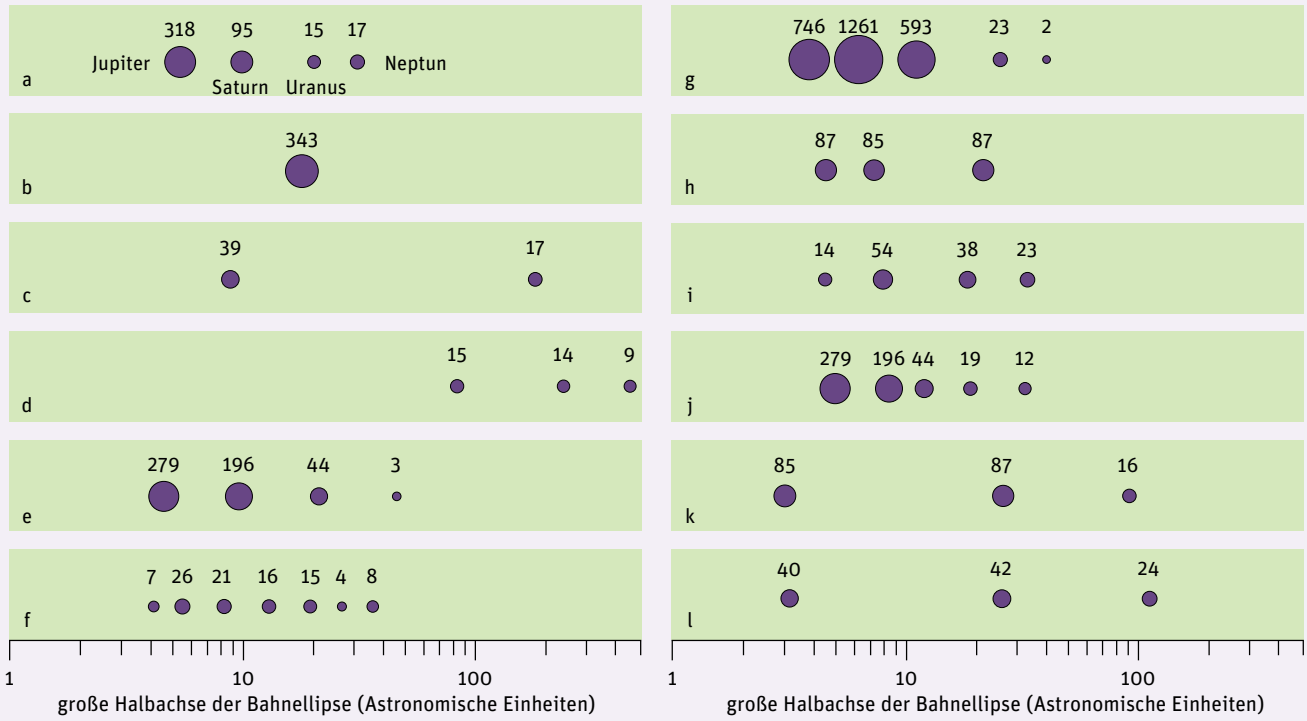
In die vorherrschende Theorie zur Entstehung des Sonnensystems, die erstmals im Jahr 1755 von dem Philosophen Immanuel Kant formuliert wurde, fügen sich die neuen Ideen auf ganz natürliche Weise ein. Nach Kants Theorie der Nebelakkretion entstanden das Sonnensystem und auch andere Planetensysteme durch die Kondensation und Ansammlung von Staub und Gas in einer abgeplatteten Scheibe um einen jungen Stern. Moderne

NEUESTE FUNDE I

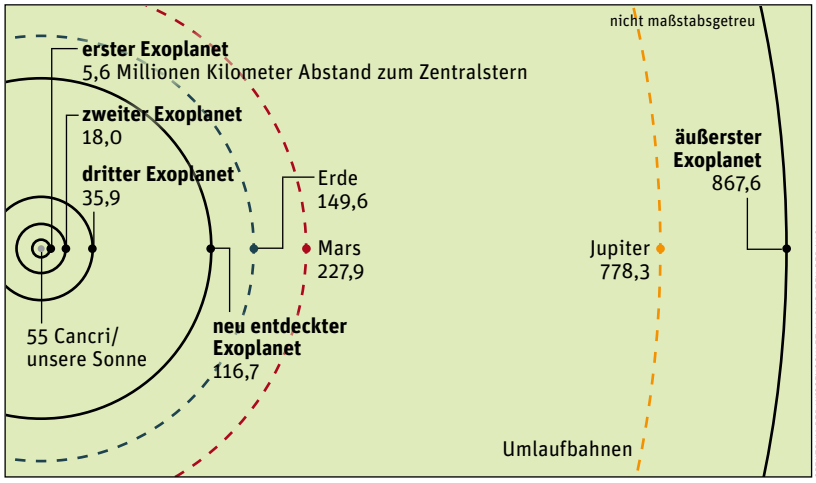
Jüngst fand die Hypothese der bis an den »Rand« gefüllten Planetensysteme weitere Bestätigungen. Jacob L. Bean nämlich, jetzt an der Universität Göttingen, und ein Team an der Universität Texas in Austin entdeckten im September 2007 einen **riesigen Gasplaneten nahe dem Stern HD 74156**.

Unmittelbar danach erhielt Bean eine E-Mail von Rory Barnes und Sean N. Raymond. Diese nämlich hatten aus ihrer Hypothese schon drei Jahre zuvor, als sie Computersimulationen zur Stabilität von Planetensystemen durchführten, die **Existenz dieses Planeten prognostiziert**.

Die **letzte erfolgreiche Voraussage dieser Art** liegt über 150 Jahre zurück: 1846 hatten Astronomen auf Grund von Unregelmäßigkeiten des Uranus-Orbits auf die Existenz von Neptun geschlossen.



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA ALLICINO NACH: HAROLD F. LEVISON ET AL., 1998



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH DATEN DER NASA

NEUESTE FUNDE II

Im November 2007 wuchs die Zahl der bekannten Planeten, die den **Stern 55 Cancri** umkreisen, von vier auf fünf an. Diesen Fund hatten Rory Barnes und Sean N. Raymond ebenfalls bereits vorhergesagt. Das Bild oben zeigt einen Vergleich unseres Sonnensystems mit dem 55-Cancri-System.

Die drei innersten Planeten des Systems laufen auf Bahnen, die enger sind als die des Merkur. Weit außen im System befindet sich ein Riesenplanet. In der Region zwischen ihnen, so hatten Berechnungen ergeben, könnte **ein weiterer Planet eine stabile Umlaufbahn** verfolgen. Entdeckt wurde er nun von einem Team um Debra Fischer von der San Francisco State University: »Dieses System scheint mit Planeten vollgepackt zu sein«, sagte sie und bestätigte damit die in diesem Beitrag vorgestellte Hypothese.

Der neu entdeckte Planet befindet sich in der »bewohnbaren Zone« des Systems. Seine starke Gravitation dürfte die Entstehung von Leben zwar verhindert haben, auf möglichen Monden jedoch könnte die Umwelt freundlicher sein. Teammitglied Geoff Marcy von der Universität von Kalifornien in Berkeley ergänzte: »Wir wissen nun auch, dass **ein Planetensystem wie das unsrige im Universum keineswegs ungewöhnlich** ist.«

Beobachtungen liefern starke Argumente für diese Theorie, denn Astronomen entdecken mittlerweile routinemäßig solche Scheiben um neugeborene fremde Sterne.

Die staubkorngroßen Partikel in diesen Scheiben verbinden sich zunächst zu Billionen felsiger Asteroiden und eisiger Kometen mit wenigen Kilometer Durchmesser, den Planetesimalen. Diese Objekte stoßen relativ sanft zusammen und formen auf diese Weise Hunderte von mond- bis marsgroßen Planeten-»Embryos«, die ihre Bahnen inmitten der verbliebenen Planetesimale ziehen. Einige Embryos (der Begriff ist in der Fachwelt üblich, Anm. d. Red.) in den äußeren Bereichen der Scheibe wachsen so stark, dass sie durch ihre Schwerkraft das in der Scheibe reichlich vorhandene Gas an sich ziehen – aus ihnen entstehen schließlich die Riesenplaneten.

Solange die Planetesimale den Hauptanteil der Scheibenmasse ausmachen, übt ihre Schwerkraft einen lokalen Dämpfungseffekt, die »dynamische Reibung«, auf die Bewegung der Embryos aus. Dadurch verhält sich das ganze System weit gehend stabil. Die Embryos wachsen unterdessen an, indem sie Materie aus den so genannten Fütterungszonen der Scheibe aufnehmen, und verteilen sich relativ gleichmäßig auf verschiedene Umlaufbahnen. Haben die Embryos aber den größten Teil der Materie aus der Scheibe aufgenommen, wird der Dämpfungseffekt zu schwach, als dass er das System weiter unter Kontrolle halten könnte. Die gravitativen Störungen, denen die Embryos gegenseitig ausgesetzt sind, können die Exzentrizitäten ihrer Umlaufbahnen jetzt praktisch unbegrenzt vergrößern. Darum bricht im entstehenden Sonnensystem zu diesem Zeitpunkt eine Epoche der Anarchie an. In der Schlussphase der Planetenentstehung beginnen die Bahnen der Embryos, sich zu überschneiden, und es kommt zu gewaltigen Zusammenstößen und Verschmelzungen. Einige Embryos werden auch in die Galaxis hinauskatapultiert, wo sie seither zwischen den Sternen umhertreiben.

Die kraterübersäten Oberflächen der Himmelskörper, die sich im jungen Sonnensystem bildeten, insbesondere einige Monde und Asteroiden, zeugen noch heute von dem damaligen Bombardement. Auch die Entstehung des irdischen Monds fällt in diese Zeit. Ein marsgroßer Embryo kollidierte mit der Proto-Erde, wodurch eine gewaltige Menge an Trümmern ins All geschleudert wurde. Aus einem Teil dieser Trümmer wiederum bildete sich schließlich der Mond.

Mittels Computermodellen können Theoretiker heute die Entwicklung von Planetensystemen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen, also unterschiedlichen Gas- und Staubscheiben verfolgen. Einige dieser Simulationen führen zu Systemen, deren Massen und Umlaufbahnen denen unseres Sonnensystems ähneln. Andere produzieren Systeme mit Riesenplaneten in exzentrischen Umlaufbahnen. In solchen Fällen reduzieren Zusammenstöße und Hinauswürfe die Zahl der Planeten und vergrößern die durchschnittlichen Abstände zwischen ihnen. Die Planeten stehen gewissermaßen miteinander im Wettstreit um die Nutzung des Raums und verschaffen sich mit ihren gravitativen Ellbögen Platz. Die Bildung der Planeten hängt dabei extrem stark von den Anfangsbedingungen ab, wie die Simulationen zeigen. Wenn zu Beginn der Rechnungen nur ein einziger von hundert Embryos um einen Meter verschoben wird, kann dies darüber entscheiden, ob am Ende drei oder fünf terrestrische Planeten entstehen.

Die Existenz unserer Erde, so legen Ergebnisse wie diese nahe, verdankt sich also dem reinen Zufall. Mittlerweile können die Forscher sogar überprüfen, ob ihre Simulationen der Realität entsprechen. Denn seit mehr als einem Jahrzehnt entdecken astronomische Beobachter Planetensysteme um andere Sterne und kartografieren deren Konfigurationen. Weit über 250 Exoplaneten haben die Planetenjäger bereits aufgespürt, mehr als sechzig davon in Systemen, die über mehr als einen Planeten verfügen.

Zu ihrer Überraschung mussten die Astronomen in dieser Zeit lernen, dass die meisten extrasolaren Planeten weitaus exzentrischere Umlaufbahnen als die Riesenplaneten unseres Sonnensystems besitzen. Früher war man ganz selbstverständlich davon ausgegangen, dass fremde Planetensysteme unserem eigenen mit seinen nahezu kreisförmigen Bahnen ähneln würden. Vielleicht, so argumentierten einige Forscher daraufhin, ist das Sonnensystem also eine Ausnahme und die meisten Planetensys-

teme sind auf andere Weise entstanden. Doch das erscheint inzwischen als unwahrscheinlich.

Mario Jurić und Scott Tremaine von der Universität Princeton haben unlängst Tausende von Computersimulationen durchgeführt, um die dynamische Entwicklung von zehn oder mehr Riesenplaneten in einer Scheibe zu verfolgen, die Kollisionen, Verschmelzungen und Hinauswürfen ausgesetzt sind. In Simulationen, die mit relativ eng beieinander stehenden Planeten beginnen, ähnelt die Verteilung der Bahnexzentrizitäten am Ende zumeist aufs Schönste der bei Exoplaneten beobachteten Verteilung. Beginnen die Simulationen jedoch mit Planeten, die weiter voneinander entfernt sind, und kommt es daher zu weniger Wechselwirkungen, so sind die Bahnexzentrizitäten der überlebenden Planeten kleiner, ähnlich wie es in unserem Sonnensystem der Fall ist.

Die meisten Simulationen enden mit zwei oder drei Riesenplaneten, nachdem mindestens die Hälfte der ursprünglichen Population aus dem System hinausgeworfen wurde. In der Galaxis könnte es also viele Planeten geben, die frei umhertreiben. Auch andere Untersuchungen bestätigen, dass viele – wenn nicht die meisten – der Welten, die ursprünglich um einen Stern entstehen, in den interstellaren Raum hinausgeworfen werden.

Wir haben sie nur noch nicht gefunden!

Die meisten der bekannten extrasolaren Planeten sind massereicher als die Planeten im Sonnensystem und besitzen kürzere Umlaufzeiten und exzentrischere Bahnen. Das bedeutet allerdings nicht unbedingt, dass unser System ungewöhnlich ist. Denn gegenwärtige Beobachtungsmethoden erlauben vor allem die Entdeckung von Riesenplaneten mit mindestens zehnfacher Erdmasse und Umlaufzeiten von einigen Jahren oder weniger. Selbst wenn es ganz in der Nähe ein Sternsystem gäbe, das identisch mit dem unsrigen ist, würden wir dessen Riesenplaneten mit ihren langen Umlaufzeiten nur mit einiger Mühe entdecken. Zweifellos existieren in vielen der uns mittlerweile bekannten Systeme auch kleinere, terrestrische Planeten – wir haben sie nur noch nicht gefunden.

Vor einigen Jahren untersuchten Rory Barnes und Thomas Quinn von der Universität Washington, wie stabil extrasolare Planetensysteme mit zwei oder mehr Planeten sind. Mit Hilfe von Computersimulationen fanden sie heraus, dass nahezu alle Systeme mit Planeten, die eng genug benachbart sind, um sich gegenseitig durch ihre Schwerkraft zu beeinflussen – einschließlich unseres eigenen – nahe an der Grenze zur Instabilität liegen. Schon kleine Änderungen der Planetenbahnen hätten katastrophale Folgen für sie. Auf den ersten Blick erscheint dieser Befund überraschend, doch die Häufigkeit solcher Systeme an der Stabilitätsgrenze lässt sich Barnes und Quinn zufolge gut begründen. Sie ist nämlich genau dann zu erwarten, wenn sich ursprünglich instabile Systeme durch das Hinauswerfen massereicher Körper allmählich selbst stabilisieren.

Auch Barnes, jetzt an der Universität von Arizona tätig, und Sean N. Raymond von der Universität von Colorado stellten deshalb wie zuvor schon Laskar die Hypothese auf, dass alle Planetensysteme bis fast an ihre Kapazitätsgrenzen mit Planeten gefüllt sind. Als sie in einigen der beobachteten Systeme auf scheinbar leere Stabilitätsregionen um den Zentralstern herum stießen, sagten sie daher voraus, dass sich in diesen Regionen weitere Planeten befinden, die bislang nur auf Grund ihrer geringen Größe nicht aufgespürt wurden. Die ersten Erfolge stellten sich sogar bereits ein (siehe Kasten auf S. 31 und 32).

Diese Hypothese ist faszinierend: Das Sonnensystem und andere ihrer stürmischen Jugend entwachsene Systeme sind gewissermaßen bis nahe an den Rand ihrer Kapazität mit Planeten gefüllt. Die gegenwärtige Konfiguration der Systeme umfasst also so viele Himmelskörper wie nur möglich. Und ihre Bahnen liegen so eng beieinander, wie es die Stabilität gerade eben erlaubt. Genau das erwartet man als Ergebnis eines chaotischen Prozesses. Eine Familie aus Planetenembryos wächst, weil sie durch den großen Schwarm kleinerer Objekte in der Staubscheibe »gefüttert« wird, so lange, bis es zu einer globalen Instabilität in der Scheibe kommt. Die umherschwirrenden Himmelskörper kollidieren dann mit den größeren Welten und verschmelzen mit diesen, oder sie werden aus dem System hinausgeworfen, bis das System einen reifen Zustand am Rand der Stabilität erreicht hat. Letztlich erhöht das Sonnensystem durch diesen Prozess der Selbstorganisation seine innere Ordnung, indem es Unordnung, »Entropie«, in Form von überzähligen Planeten an die Galaxis abgibt.

Wie jede gute wissenschaftliche Hypothese macht auch diese überprüfbare Vorhersagen. In den Stabilitätsregionen der Systeme suchen die Astronomen daher nun nach weiteren Planeten. Weil kleinere Planeten schwerer zu entdecken sind, kann dies allerdings einige Zeit dauern. Gleichzeitig jedoch werden die Beobachtungstechniken immer besser. Es ist also nur eine Frage der Zeit, bis wir wissen, ob die Idee der bis zum Rand gefüllten Planetensysteme der kritischen Überprüfung standhält. ◁

Steven Soter ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für Astrophysik des Amerikanischen Museums für Naturgeschichte in New York City und Gastwissenschaftler an der Universität New York. Das Spektrum seiner Lehrveranstaltungen reicht von Astrobiologie über Geologie bis hin zur antiken Geschichte des Mittelmeerraums. Zu seinen Forschungsinteressen zählen Planetenastronomie und Geoarchäologie.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912784.

What is a planet? Von Steven Soter in: The Astronomical Journal, Bd. 132, S. 2513, 2006. Online: http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0608359v3

Predicting planets in known extrasolar planetary systems. II. Testing for Saturn mass planets. Von S. N. Raymond und R. Barnes in: The Astrophysical Journal, Bd. 619, S. 549, 2005. Online: http://arxiv.org/abs/astroph/0404211

The role of chaotic resonances in the solar system. Von N. Murray und M. Holman in: Nature, Bd. 410, S. 773, 2001

Terrestrial planet formation around individual stars within binary star systems. Von E. V. Quintana et al. in: The Astrophysical Journal, Bd. 660, S. 807, 2007. Online: http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0701266

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

HELL WIE TAUSEND

Sie sind kaum größer als unser Sonnensystem, doch strahlen sie um ein Vielfaches heller als ganze Galaxien. Ihre gigantische Leuchtkraft, die Forschern lange Zeit schier unüberwindliche Rätsel aufgab, gewinnen Quasare aus energiereichen Prozessen rund um supermassereiche Schwarze Löcher.

Von Suzy Collin

Dezember 1962: Als Maarten Schmidt sein Teleskop auf einen schwach leuchtenden, bläulichen Lichtpunkt richtet, ahnt er nicht, dass er eine der wichtigsten astronomischen Entdeckungen des 20. Jahrhunderts machen würde. Anhand seiner Messdaten stellt der niederländische Astronom bald fest, dass er ein ganz besonderes Gestirn im Visier hatte. Zwei Milliarden Lichtjahre entfernt strahlt es so hell wie tausend Galaxien, ist aber nur ein millionstel Mal so groß wie eine von ihnen. Schmidts Fund, der ihm vom nahe bei San Diego gelegenen Observatorium auf dem Mount Palomar aus gelungen war, erwies sich nicht als Einzelfall: Bald fand man Hunderte ähnlicher Himmelskörper. Mittlerweile kennt man über hunderttausend Objekte dieser Familie, darunter sogar solche, die älter sind als 13 Milliarden Jahre und von der Zeit nach dem Urknall zeugen, als sich gerade erste Strukturen im Universum bildeten.

Zu Schmidts Zeit wusste allerdings niemand, mit welchem Phänomen man es zu tun hatte. So wurden die außergewöhnlichen Himmelserscheinungen zunächst einmal als quasistellare Radioquellen bezeichnet, ein Begriff, der bald zu Quasare verkürzt wurde. Doch viele Fragen blieben offen, darunter die wichtigste: Wie kann eine so große Strahlungsleistung in einem so geringen Raumvolumen erzeugt werden? Ganz offensichtlich war hier eine neue und faszinierende Physik mit im Spiel. Doch welche? An dieser Frage entzündeten sich heftige Debatten, die über viele Jahre andauerten.

Insbesondere jene Exemplare, die man an der Grenze des beobachtbaren Universums fand, weckten zunächst auch die Hoffnung, sie könnten als kosmologische Standardkerzen den Schlüssel zu dessen Geometrie und Dynamik liefern. »Standardkerzen« sind Himmelsobjekte, deren absolute Leuchtkraft sehr gut bekannt ist, sodass man aus dem bei uns ankommenden »Restlicht« auf ihre Entfernung schließen kann. Zu ihnen gehören eine bestimmte Klasse von Supernovae ebenso wie pulsierende Cepheiden-Sterne, deren maximale Leuchtkraft direkt mit der Dauer des Zyklus zusammenhängt, in dem sie heller und wieder dunkler werden. Quasare jedoch sind zu vielfältig, um als Standard dienen zu können, wie sich bald zeigte.

In anderer Hinsicht jedoch erwiesen sie sich als hilfreich. Hunderte von Absorptionslinien in ihren Spektren nämlich geben den Astronomen Aufschluss über riesige Gaswolken, die auf unserer Sichtlinie zu den Quasaren durch den intergalaktischen Raum ziehen. Anhand der Spektrallinien lassen sich die Distanzen zu diesen Wolken vermessen und – weil die meisten Quasare ihr Licht schon vor langer Zeit abstrahlten – ihre räumliche Verteilung vor Milliarden von Jahren. Dies wiederum erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die Entwicklungsgeschichte des Universums.

Stillgelegte Kraftwerke

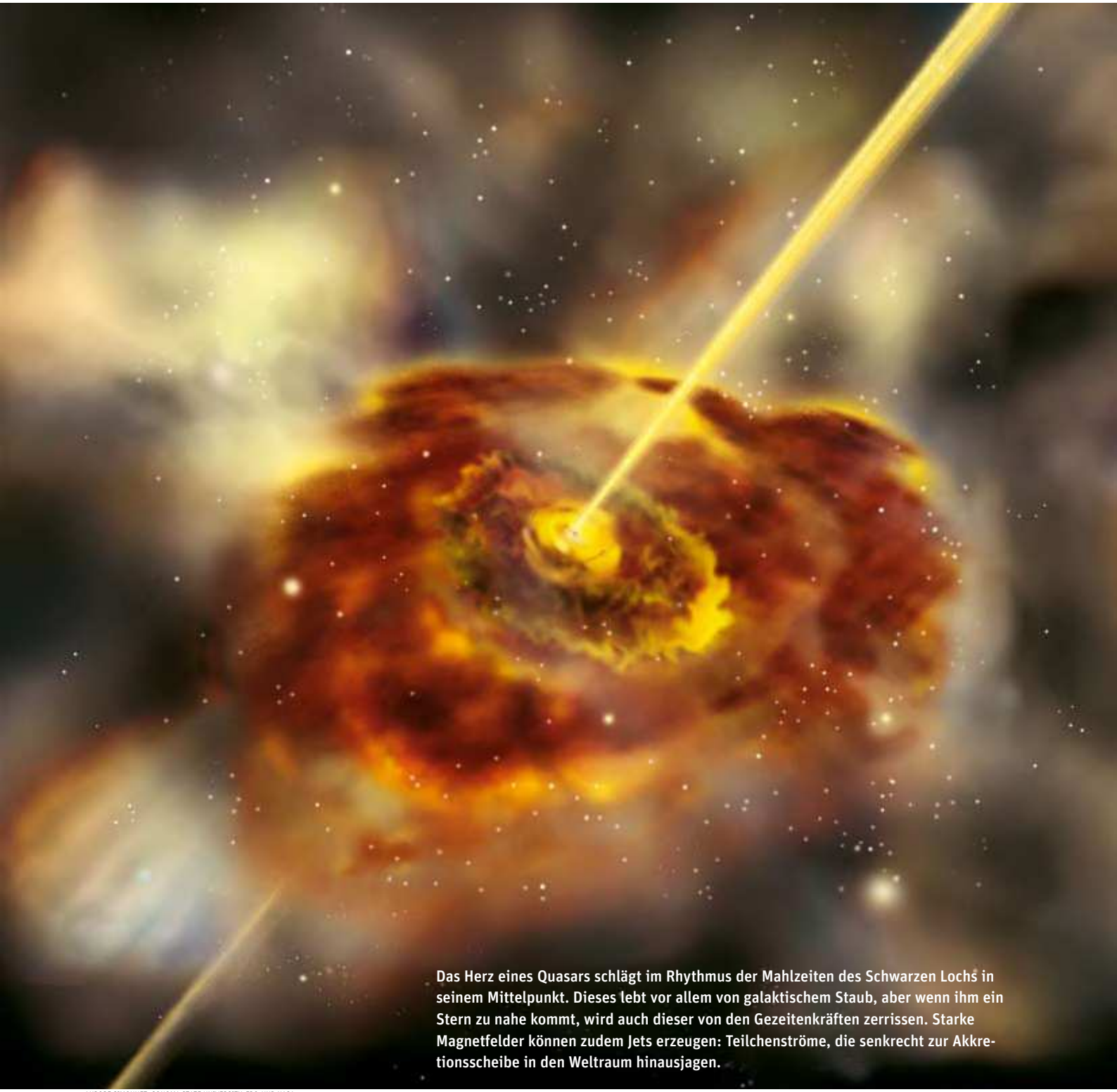
Zu den bedeutendsten Fortschritten in der Quasarforschung kam es jedoch in jüngerer Zeit, als man entdeckte, dass diese Himmelskörper eine fundamentale Rolle bei der Entwicklung von Galaxien spielen. Mittlerweile wissen wir sogar, dass fast alle Galaxien am Anfang ihres Lebens Quasare waren und in ihrem Inneren auch heute noch die Kraftwerke beherbergen, die einst so immense Aktivität entfalteten.

Der Weg zu diesen Einsichten ist allerdings mühevoll gewesen. Quasare sind ein hervorragendes Beispiel dafür, welche Hürden der wissenschaftlichen Suche nach Erkenntnis im

In Kürze

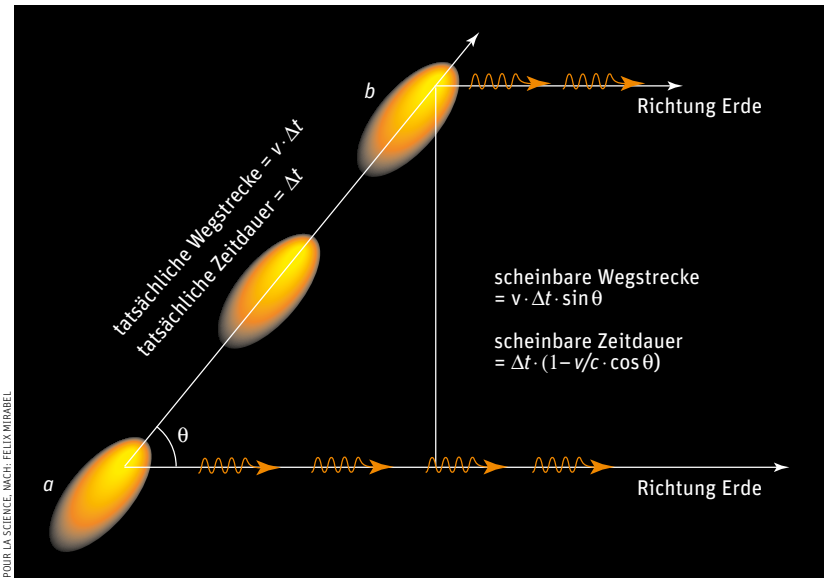
- Als 1962 der **erste Quasar** entdeckt wurde, konnten sich Forscher nicht erklären, wie seine gigantische Leuchtkraft zu Stande kam. Solche Objekte strahlen heller als tausend Galaxien.
- Obwohl bereits früh vorgeschlagen wurde, dass **supermassereiche Schwarze Löcher** die Ursache für die Strahlung seien, beschritten die Forscher viele wissenschaftliche Irrwege, bis sie das Phänomen endlich aufklären konnten.
- Mittlerweile hat die Erforschung der Quasare hohe Bedeutung erlangt, denn sie sind aufs Engste mit der **Entwicklungsgeschichte** von Galaxien verbunden.

GALAXIEN



Das Herz eines Quasars schlägt im Rhythmus der Mahlzeiten des Schwarzen Lochs in seinem Mittelpunkt. Dieses lebt vor allem von galaktischem Staub, aber wenn ihm ein Stern zu nahe kommt, wird auch dieser von den Gezeitenkräften zerrissen. Starke Magnetfelder können zudem Jets erzeugen: Teilchenströme, die senkrecht zur Akkretionsscheibe in den Weltraum hinausjagen.

AURORE SIMONNET, SONOMA STATE UNIVERSITY, EPO UND NASA



POUR LA SCIENCE, NACH: FELIX MIRABEL

Überlichtschnelle Jets aus Quasaren gibt es nicht, auch wenn es zunächst so scheint. Astronomen bestimmen die Geschwindigkeit des Jets, indem sie die Bewegung leuchtender Knoten darin vermessen. Dabei ergeben sich scheinbare Werte, die von den tatsächlichen abweichen. Berechnet man aus ihnen die Geschwindigkeit, kann das Ergebnis die Lichtgeschwindigkeit weit übersteigen. Erst wenn die scheinbare Zeitdauer zwischen der Ankunft des Lichts, das die Knoten bei *a* beziehungsweise bei *b* aussandten, relativistisch korrigiert wird, gelangt man zu physikalisch sinnvollen Ergebnissen.

Weg stehen können – insbesondere dann, wenn Phänomene beobachtet werden, die zunächst völlig unbegreifbar erscheinen. Fehler, falsche Fährten und heftige Kontroversen sorgten dafür, dass die Astronomen erst zwanzig Jahre nach Schmidts Entdeckung zu einem Konsens über die physikalischen Eigenschaften der Quasare gelangten. Und erst weitere zehn Jahre später begann man, ihrer engen Beziehung zu den Galaxien auf die Spur zu kommen.

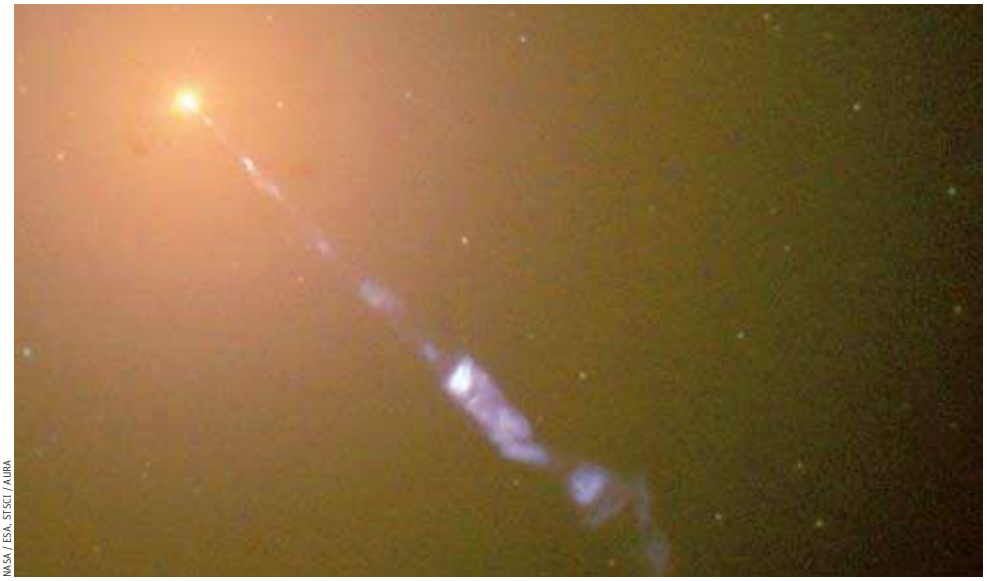
Schmidt hatte eigentlich nur das Spektrum eines »Sterns« aufnehmen wollen, der an derselben Position wie eine schon bekannte Radioquelle zu sehen war. Letztere war im dritten Cambridge-Katalog der Radioquellen, dem Katalog »3C«, unter der Nummer 273 registriert. Der Niederländer bemerkte nun, dass alle Emissionslinien im Spektrum von 3C 273 um 16 Prozent zu größeren Wellenlängen hin, also »rotverschoben« waren. (Die Farbe Rot ist die langwelligste der sichtbaren Farben.) Ein paar Tage später entdeckte man im Spektrum eines anderen »Sterns« des Cambridge-Katalogs, 3C 48, denselben Effekt. Diesmal betrug die Rotverschiebung sogar 37 Prozent.

Ursache dieses Phänomens ist die fortdauernde Expansion des Universums. Während eine Lichtwelle den Kosmos durchquert, dehnt sich der Raum und mit ihm auch die Welle aus. Entsprechend verschieben sich die Emissions- und Absorptionslinien im gemessenen Frequenzspektrum. Aus dieser Rotverschiebung lässt sich schließlich auf die Entfernung des Objekts schließen, das die Wellen abgestrahlt hat. Die Rotverschiebungen der 3C-Objekte besagen nun, dass 3C 273 zwei Milliarden und 3C 48 sogar 3,7 Milliarden Lichtjahre entfernt ist. Zu Schmidts Zeiten waren das gigantische Abstände: Nur ein einziger Galaxienhaufen, kaum sichtbar auf den Fotos vom Palomar Observatory, schien sich in ähnlicher Distanz von der Erde zu befinden. Über 3C 273, den man schon seit Jahrhunderten beobachtete, wusste man zudem, dass sich sein Leuchten im Zeitraum von einer Woche verstärkte und wieder abschwächte. Daraus wiederum konnte man auf einen Durchmesser des Objekts von weniger als einer Lichtwoche schließen (siehe den Kasten rechts). Zum Vergleich: Unser Sonnensystem hat, wenn man die Bahn von Pluto als Begrenzung annimmt, einen Durchmesser von knapp einem halben Lichttag.

Einige Forscher vermuteten die Ursache der Strahlung in Supernovae, die nacheinander in einer Kettenreaktion explodierten

Doch wie sollte man die gigantische Leuchtkraft erklären? Im Lauf der Jahre stellten die Forscher eine ganze Reihe von Hypothesen auf. Eine davon vermutete die Ursache der Strahlung in Supernovae, die nacheinander in einer gigantischen Kettenreaktion explodierten. Dieser Vorschlag setzte allerdings die Existenz einer Region mit einer sehr hohen Dichte an massereichen Sternen voraus. In einer solchen Region jedoch, so das Gegenargument, würden sie sich schnell zu einem einzigen gigantischen Stern vereinigen, statt als Supernovae zu verglühen.

Die populärste Hypothese ging sogar davon aus, dass ein Stern mit mehr als einer Milliarde Sonnenmassen existieren könnte. In diesem Fall müsste die beobachtete Strahlung aus einem noch viel kleineren Volumen stammen. Außerdem müsste ein solches Objekt sehr schnell rotieren: Dann würden ihm Fliehkräfte helfen, dem eigenen Gewicht standzuhalten und nicht zu kollabieren. Keine dieser Theorien bot allerdings eine Erklärung. Ein supermassereicher Stern beispielsweise hätte insbesondere im Röntgenbereich ande-



NASA / ESA, STSCI / AURA

Die Galaxie Messier 87 ist eine elliptische Galaxie und Zentrum des Virgo-Galaxienhaufens. Das Bild des Hubble-Weltraumteleskops zeigt, wie ein Materiestrahl von 5000 Lichtjahren Länge und mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit ausgestoßen wird. Komplementäre Beobachtungen im Radiowellenlängenbereich haben es ermöglicht, die für den Jet verantwortliche Aktivität eines der mit drei Milliarden Sonnenmassen schwersten Schwarzen Löcher zu finden.

re Emissionen verursacht, als sie beobachtet wurden.

Unterdessen hatte Schmidts Entdeckung den Eifer der Beobachter angestachelt: Bald folgte ein Quasarfund dem anderen. Weil die meisten von ihnen im Radiowellenbereich gar nicht oder nur schwach leuchteten, unterschied man die vielen radioleisen von den wenigen radiolauten Exemplaren. Als Sammelbegriff für beide bürgerte sich schließlich auch der Begriff QSO für quasistellares Objekt ein.

Trotzdem: Je intensiver man das Phänomen untersuchte, umso mysteriöser schien es zu werden. Man entdeckte sogar Quasare, die Gaswolken mit Überlichtgeschwindigkeit ausstoßen! Einsteins Spezielle Relativitätstheorie, der zufolge sich keine Information mit Überlichtgeschwindigkeit fortpflanzen kann, wurde dadurch allerdings nicht in Frage gestellt. Denn der Effekt fand eine einleuchtende Erklärung (siehe Grafik links und Bild oben). Aber auch die Absorptionslinien in einigen Spektren erstaunten die Forscher: Ihre Rotverschiebung und damit die Entfernung des sie erzeugenden Objekts war kleiner als die der entsprechenden Emissionslinien!

Ermüdete Photonen?

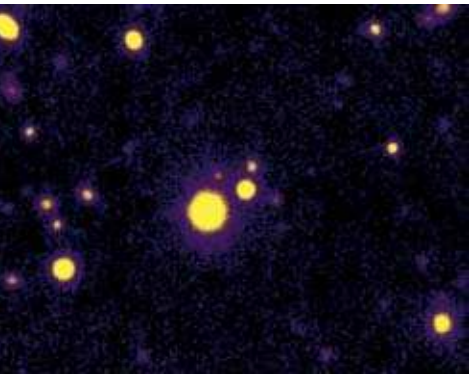
Dies heizte die ohnehin schon leidenschaftliche Debatte noch zusätzlich an. Nicht wenige Astronomen, vor allem jene, die es nach einer neuen und »exotischen« Physik verlangte, zweifelten sogar das Hubble-Gesetz an, das die Rotverschiebung mit der Entfernung in eine Beziehung setzt. Waren uns Quasare vielleicht näher, als es Hubbles Gesetz besagte? Selbst eine Ermüdung der Photonen auf ihrer langen Reise durchs All wurde in Betracht gezogen, um das Rätsel der Rotverschiebung zu erklären. Doch viele Forscher wehrten sich dagegen, dass ein noch unbekanntes physikalisches Gesetz als Lösung herhalten sollte. So kam es zu einer teilweise sehr heftig geführten Kontroverse, die rund eineinhalb Jahrzehnte andauerte.

Nach und nach ließen sich die Fragen jedoch im Rahmen der etablierten Physik beantworten. Zum Beispiel konnte man für einige Quasare nachweisen, dass sie gleiche Rotverschiebungen wie bestimmte Galaxienhaufen besaßen – sie mussten sich also in derselben Entfernung befinden. Außerdem gelang es, jene Absorptionslinien mit einer geringeren als der erwarteten Rotverschiebung durch weniger weit entfernte Materie zu erklären, die auf unserer Sichtlinie zu den Quasaren lag. Diese Erkenntnis kam allerdings spät, denn lange Zeit war unklar gewesen, wie viele Galaxien und intergalaktische Gaswolken sich zwischen uns und den Quasaren befinden. Zudem hatte man weitere Absorptionslinien gefunden, die im Vergleich zu den Emissionslinien ebenfalls eine kleinere Rotverschiebung aufwiesen, sich überraschenderweise aber nicht durch Gaswolken erklären ließen. Schließlich zeigte sich, dass die entsprechende Strahlung doch dem Quasar entstammte. Sie wurde allerdings von Materie verursacht, die sich mit hoher Geschwindigkeit in Richtung der irdischen Beobachter bewegte – dieses Phänomen kompensierte einen Teil der Rotverschiebung.

Die Antwort auf die Kernfrage indessen, nämlich die Ursache der außergewöhnlichen Strahlungsleistung der Quasare, ließ zwanzig Jahre auf sich warten. Und das, obwohl sie von einigen kreativen Forschern bereits bei der Entdeckung der Quasare vorausgesagt worden war – doch mit ihrer unorthodoxen

ABGESCHÄTZT

Erscheint ein Himmelsobjekt wie **ein Quasar mit variabler Leuchtstärke**, lässt sich sein Volumen durch folgende Überlegung abschätzen. Man stelle sich vor, der Quasar sei ein Blitzlicht wie das eines Fotoapparats und dieser Blitz werde ausgelöst. Dann erreicht uns **das Licht von der uns zugewandten Seite des Quasars** früher als das Licht von dessen Mittelpunkt, das wiederum früher kommt als das Licht der »Rückseite«. Von der Erde aus gesehen blitzt der Quasar also nicht kurz auf, vielmehr zieht sich das Phänomen in die Länge. Die **Dauer des lang gezogenen Blitzes** verrät nun, wie viel Zeit Licht braucht, um die zusätzliche Wegstrecke zwischen Rück- und Vorderseite zurückzulegen. Braucht es eine Woche, beträgt der Durchmesser des Quasars also höchstens eine Lichtwoche.



ESO

DREIFACHFUND

- Anfang des Jahres 2007 verkündeten schweizerische und US-amerikanische Astronomen den **Fund des ersten Dreifach-Quasars** mit Hilfe des Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte und des Keck-Observatoriums auf Hawaii. Die Konstellation aus drei Galaxien, die supermassereiche Schwarze Löcher beherbergen, liegt 10,5 Milliarden Lichtjahre entfernt im Sternbild Jungfrau. Rund 100 000 Quasare sind bekannt, doch schon der Fund eines Doppelquasars ist höchst selten: Bislang wurden weniger als 100 enge Paare entdeckt.
- **Der zuerst 1989 entdeckte Quasar LBQS 1429-008** war ursprünglich nicht einmal als Doppelquasar erkannt worden. Die Forscher hatten die zweite Leuchtquelle als Folge des Gravitationslinseneffekts gedeutet, bei dem die Schwerkraft von Galaxien das Licht eines Objekts so beeinflusst, dass es auf mehreren Wegen zur Erde gelangt und dort »doppelt« gesehen wird.
- **Die drei Quasare** sind jeweils rund 100 000 bis 150 000 Lichtjahre voneinander entfernt, das entspricht etwa dem Durchmesser der Milchstraße. Das Licht, das wir von ihnen sehen, entstammt einer Epoche der kosmischen Geschichte, in der Fusionen von Galaxien, die zu besonders schweren Schwarzen Löchern führen, sehr häufig waren.

Hypothese waren sie ihrer Zeit wohl zu weit voraus gewesen. Diese Wissenschaftler führten die mysteriösen Eigenschaften der Quasare nämlich auf nicht minder mysteriöse Objekte zurück: Schwarze Löcher.

Ein Paar aus einem normalen Stern und einem Schwarzen Loch, so wissen Astrophysiker seit Ende der 1970er Jahre, sendet starke Röntgenstrahlung aus. Entstehen kann eine solche Konstellation, wenn der weiterentwickelte Partner eines Doppelsternsystems eines Tages ausbrennt und explodiert, woraufhin ein großer Teil seines Inneren kollabiert. Neben solchen relativ leichten stellaren Schwarzen Löchern, den Überresten eines einzelnen Sterns, existieren im Zentrum von Galaxien auch Schwarze Löcher, die in sich einige hundert Millionen Sonnenmassen vereinen.

Aus der näheren Umgebung solcher supermassereicher Objekte stammt äußerst intensive Strahlung. Ihre Ursache liegt letztlich in der starken Anziehungskraft, die das Schwarze Loch auf die Materie in seiner Umgebung ausübt. Materieteilchen werden dadurch bis auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, fallen aber nicht direkt in das Loch, sondern bewegen sich spiralförmig in einer Akkretionsscheibe darauf zu. Bei diesem Vorgang üben sie starke Reibung aufeinander aus und erhitzen sich so auf Temperaturen von vielen Millionen Grad, wodurch ultraviolette Strahlung entsteht.

Ihre Beobachtungen dieser Strahlung hatte die Astronomen allerdings auf die falsche Fährte geführt. Zwanzig Jahre lang nämlich vermuteten sie, es handele sich dabei um Synchrotronstrahlung. Sie entsteht, wenn Elektronen mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit durch ein Magnetfeld fliegen und von diesem abgelenkt werden. Allerdings ist sie nur in den relativ seltenen radiolauten Quasaren zu finden. Hier entstammen sie einem Jet geladener Teilchen, die als gebündelter Strahl in Richtung der Drehachse der Akkretionsscheibe ausgestoßen werden. Erst mit Beginn der 1980er Jahre bildete sich darum ein Konsens, dem zufolge die Strahlungsleistung von Quasaren Folge der Akkretion von Materie durch ein Schwarzes Loch im Zentrum einer Galaxie ist.

Zu diesem Zeitpunkt traf diese Erklärung jedoch nicht mehr nur auf Quasare, sondern auf eine ganze Familie auffälliger Himmelsphänomene zu. Zusammenfassend werden sie als AGN für »active galactic nuclei« oder Aktive Galaktische Kerne beschrieben. Bereits bei der Entdeckung der ersten Quasare hatte man deren Ähnlichkeit mit einigen näher gelegenen Galaxien bemerkt. Sie waren 1943 von dem amerikanischen Astronomen Carl Seyfert untersucht und nach ihm benannt worden, stießen aber erst mit Maarten Schmidts Entdeckung auf größeres Interesse. Bis auf die geringere Leuchtleistung nämlich besitzen Seyfert-Galaxien dieselben Eigenschaften wie Quasare. Heute werden analoge Phänomene im Herzen von ungefähr einem Prozent der nahen Galaxien beobachtet. Eine vergleichsweise winzige zentrale Struktur leuchtet so hell, dass sie das gesamte Sternsystem mit ihrer Strahlung dominiert.

Zu den AGNs gehören aber auch die Radiogalaxien. Ihren Namen verdanken sie ihrer intensiven Radiostrahlung. Eine weniger als ein Lichtjahr große Region in deren Kern erzeugt einen Teilchenstrahl, der – von uns aus gesehen in seitlicher Richtung – fast mit Lichtgeschwindigkeit daraus hervorschießt. Die Teilchen durchjagen den Raum und bilden gigantische Strukturen, die sich fern vom Kern über Millionen von Lichtjahren erstrecken.

Insgesamt wurden der Familie der AGNs damals bis zu zwei Dutzend unterschiedlicher Typen von Objekten zugeordnet. Während sie einander in ihren wichtigsten Eigenschaften glichen, fanden sich bei einer Reihe sekundärer Merkmale allerdings Unterschiede. Dies überraschte die Forscher, denn der Theorie zufolge dürften sich AGNs nur hinsichtlich der Masse des Schwarzen Lochs und der Akkretionsrate – also der vom Schwarzen Loch verschlungenen Masse pro Zeiteinheit – unterscheiden.

Bewegung im galaktischen Zentrum

Erst ein fundamentaler Fortschritt in der Theorie, das so genannte vereinheitlichte Schema, erklärte auch dieses Phänomen. Viele der Unterschiede resultieren nämlich aus der schlichten Tatsache, dass die Rotationsachsen der AGNs jeweils unterschiedlich zu unserer Sichtlinie geneigt sind. So ließ sich die außerordentliche AGN-Vielfalt endlich besser verstehen. Demnach gibt es unter anderem zwei Klassen von Seyfert-Galaxien. In einem Fall sehen wir sie von der Seite, im anderen blicken wir eher entlang der Rotationsachse auf sie. Und wenn wir einen Quasar von der Seite sehen und die Lichtquelle auf Grund des ihn umgebenden Staubtorus nicht direkt beobachten können, erscheint er uns als stark leuchtende Radiogalaxie.

Blazare wiederum sind Radiogalaxien, die wir aus der Richtung der Rotationsachse sehen, die gleichzeitig die Achse des Radiojets ist. Sie zeigen merkwürdige Eigenschaften wie starke Helligkeitsvariationen und entsenden stark polarisiertes Licht. Grund ist vor allem die in den Jets entstehende Synchrotronstrah-

lung, die durch Stoßprozesse noch verstärkt wird. Dabei werden Radiophotonen von Teilchen im Jet, die sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, in energiereichere Gammaphotonen umgewandelt.

Obwohl die Funktionsweise von Quasaren und der anderen Mitglieder der AGN-Familie mittlerweile gut verstanden ist, hat das Interesse an ihnen nicht nachgelassen. Dafür gibt es gute Gründe. Erst jüngst erwies sich zum Beispiel (siehe S. 19), dass die AGNs die leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger des Kosmos sind. Aber schon in den 1990er Jahren ermöglichte der Start von mehreren Röntgen-Weltraumteleskopen genauere Untersuchungen der von ihnen entsandten Strahlung. Insbesondere zeigten sich dabei Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie, die zweifelsfreie Hinweise auf nahe gelegene Schwarze Löcher gaben. Auch die schnelle Variation der von der Akkretionsscheibe ausgestrahlten Röntgenstrahlung sprach für die Anwesenheit solcher kompakter Objekte.

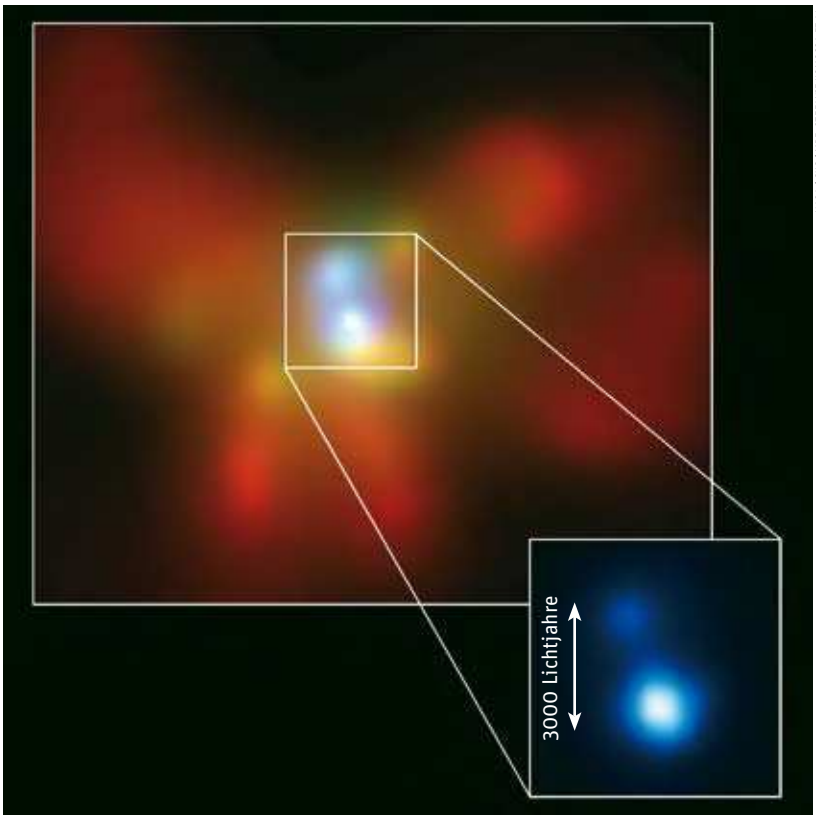
Doch die supermassereichen Schwarzen Löcher, die in Quasaren als Kraftwerk arbeiten, haben noch weit größere Bedeutung: Sie lassen sich nämlich mit der Geschichte der Galaxien in Beziehung setzen! Dies wurde möglich, weil Astronomen mittlerweile die Bewegungen von Sternen in der direkten Nachbarschaft eines Galaxienkerns messen und daraus die Masse dieses Kerns bestimmen können. Je größer seine Masse, desto schneller kreisen die Sterne um ihn herum.

So entdeckte man Anfang der 1990er Jahre, dass einige nahe Galaxien einen inaktiven Kern von mehreren Millionen bis mehreren hundert Millionen Sonnenmassen besitzen. Bestünden diese Kerne aus Sternen, müssten sie entsprechend hell strahlen. Tatsächlich aber sind sie fast unsichtbar! Von hier aus ist es natürlich nicht weit bis zu der Vermutung, dass auch diese Galaxien ein Schwarzes Loch verstecken. Und tatsächlich sagt die Theorie vorher, dass solche Massenansammlungen kollabieren und Schwarze Löcher bilden, vorausgesetzt, sie befinden sich in einer Region mit höchstens einem Lichtjahr Durchmesser. Im Fall der nächstgelegenen Galaxien benötigt man für die Beobachtung einer solch kleinen Region allerdings eine Auflösung von einer hundertstel Bogensekunde. Diese wiederum erreichen nur Teleskope von acht bis zehn Meter Durchmesser, die mit einem adaptiven optischen System ausgestattet sind.

Doch es geht auch anders, wenn man nämlich die eigene Galaxis ins Visier nimmt. Von 1995 an zeigten Beobachtungen der Europäischen Südsternwarte, dass die Sterne im Zentrum unserer Milchstraße auffällige Bewegungen vollführen, die auf die Existenz einer gewaltigen zentralen Masse schließen lassen. Mittlerweile wurde der Tanz der nur wenige Lichtstunden vom Zentrum entfernten Sterne so genau vermessen, dass er unzweifelhaft die Existenz eines Schwarzen Lochs mit vier Millionen Sonnenmassen belegt – in einem Volumen etwa so groß wie unser Sonnensystem (siehe »Das Zentrum der Milchstraße«, Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 26). An derselben Position, die dieses Massezentrum einnimmt, liegt zudem die Radioquelle Sagittarius A*. Wer sich da nicht an die Kerne von Radiogalaxien erinnert fühlt ...

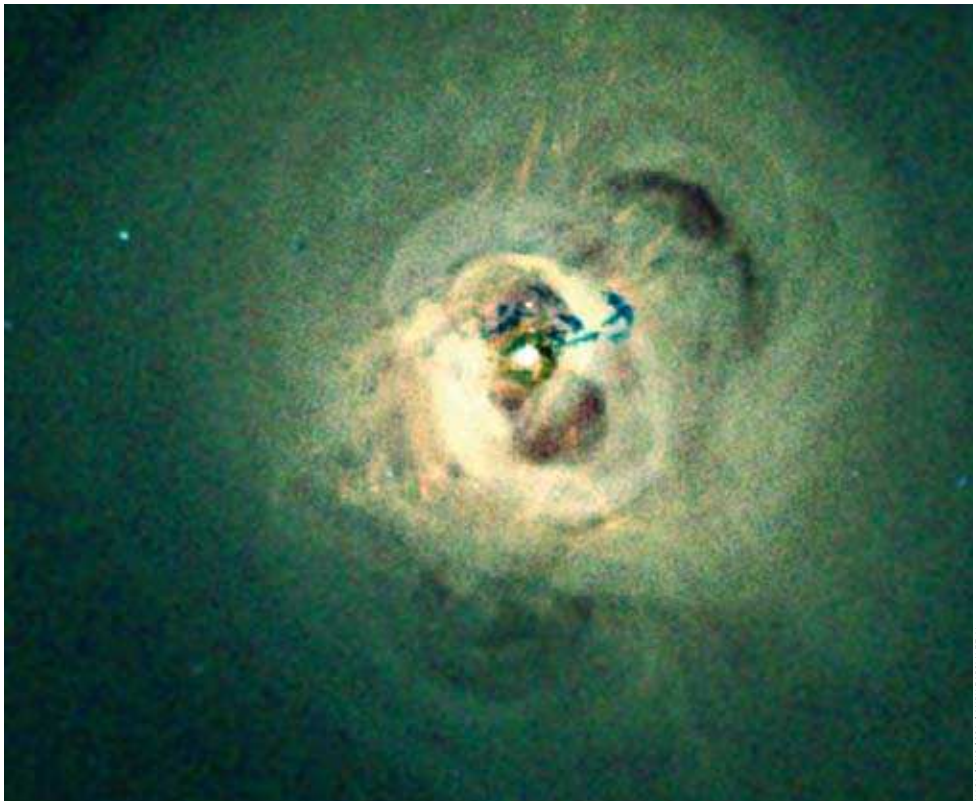
Dies führt auf eine weitere Frage. In der Vergangenheit nämlich, so hat sich gezeigt, waren Quasare viel zahlreicher und heller als heutzutage. Und in unserer nahen kosmischen Nachbarschaft gibt es überhaupt keine Quasare. Warum ist das so? Zwar besitzen fast alle Galaxien ein massereiches Schwarzes Loch in ihrem Kern, meist allerdings ist es nicht besonders aktiv. Aus der Leuchtkraft der beobachteten Quasare und ihrem Alter kann man nun auf die von ihren Schwarzen Löchern im Lauf deren Lebens verschlungene Masse schließen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass viele Quasare offenbar alle erreichbare Materie verschluckten und daraufhin mangels Nahrung erloschen. Berechnungen zufolge gibt es im lokalen Universum derzeit ebenso viele »stillgelegte« Quasare wie Galaxien, die

Die Galaxie NGC 6240 ging aus der Verschmelzung zweier Galaxien hervor. Das im Röntgenbereich vom Satelliten Chandra aufgenommene Bild offenbart die Anwesenheit gleich zweier Schwarzer Löcher. Durch ihre Verschmelzung wird in der Zukunft ein noch viel schwereres Schwarzes Loch mit voraussichtlich spektakulärer Aktivität entstehen.



NASA / CXC / MPE, STEFANIE KOMOSSA ET AL.

Im Herzen des Perseus-Galaxienhaufens befindet sich die Radiogalaxie NGC 1275. Die Jets aus relativistischen Teilchen, die vom Schwarzen Loch im Zentrum der Galaxie ausgestoßen werden, heizen die intergalaktische Materie (grün) in der Umgebung auf. Indem sie Wasserstofflinien im Spektrum untersuchen, können Astronomen die Strukturen kartieren, die durch den aktiven Quasar geformt wurden.



NASA / CXC / IOA / ANDY FABIAN ET AL.

der unseren ähneln.

Dank einer Studie über rund vierzig massereiche Schwarze Löcher in »ruhigen« Galaxien fand man gegen Ende der 1990er Jahre auch heraus, dass ihre Masse ungefähr dem Wert von zwei Tausendstel der Masse der kugelförmigen Zentralregion der Galaxie, des Bulges, entspricht.

Dasselbe Ergebnis erbrachte eine zwanzig Jahre dauernde Beobachtungskampagne, die die Masse der Schwarzen Löcher in leuchtenden AGNs untersucht. Offenbar stehen auch die Entstehungsgeschichten der Schwarzen Löcher und der Bulges ihrer Heimatgalaxien in enger Beziehung zueinander.

Das Ende der fetten Jahre

Beobachtungen der großen irdischen und der Weltraumteleskope haben die Geschichte der Quasare mittlerweile endgültig aufgeklärt. Vor rund fünf Milliarden Jahren erlebten sie ihre »fetten Jahre« und wurden immer zahlreicher und immer aktiver. In derselben Epoche entstanden auch besonders viele Sterne und Galaxien. Die Schwarzen Löcher sind also in jener Zeit gewachsen, in der auch die Galaxien – genauer: der archaischste Teil ihrer Struktur, der Bulge – ihre wichtigste Entwicklungsphase durchlebten.

Damals ernährten sich die Schwarzen Löcher von der Materie ihrer Galaxien. Galaxien interagieren und fusionieren aber auch. Die Mehrheit jener Sternsysteme mit einem großen Bulge – insbesondere die elliptischen Galaxien, die praktisch nur aus dem Bulge bestehen – haben sich nach einer Fusion von Spiralgalaxien gebildet. Dabei vereinigten sich auch die riesigen Schwarzen Löcher im Zentrum der Spiralen zu noch schwereren Exemplaren. NGC 6240, ein aus einer Fusion von zwei Galaxien entstandenes Sternsystem, ist noch heute ein Beispiel dafür. In seinem Inneren verbirgt es zwei Schwarze Löcher, wie der Satellit Chandra durch Beobachtungen im Röntgenbereich herausfand. Auch diese werden weiter wachsen und schließlich fusionieren, sodass sich die Galaxie am Ende in einen starken Quasar verwandeln wird.

Doch große Verschmelzungen sind heutzutage viel seltener als in der Vergangenheit. Dies könnte erklären, warum die relativ nahen AGNs, die aus einer Zeit geringerer Fusionstätigkeit stammen, schwächer leuchten als die entfernten Quasare. Die Mahlzeiten ihrer Schwarzen Löcher sind kleiner geworden und sie können allenfalls mit Zwerggalaxien und Gaswolken rechnen, von denen ihre Heimatgalaxien Besitz ergreifen (siehe auch »Ewig junge Milchstraße«, Spektrum der Wissenschaft 4/2004, S. 46).

Doch ein ruhiges Schwarzes Loch kann auch wieder aufwachen. Wann es dies tut, hängt vor allem von der Menge und Häufigkeit seiner Mahlzeiten ab. Wird es nur genügend gefüttert, kann jedes dieser schlafenden Monster früher oder später wieder zu strah-

Suzy Collin ist Forscherin am Centre National de la Recherche Scientifique. Dort gehört sie dem Laboratoire Univers et Théories an der Sternwarte Paris-Meudon an. Collin, die bereits in ihrer Promotion 1968 über Quasare arbeitete, war Präsidentin der französischen astronomischen und astrophysikalischen Gesellschaft SF2A.

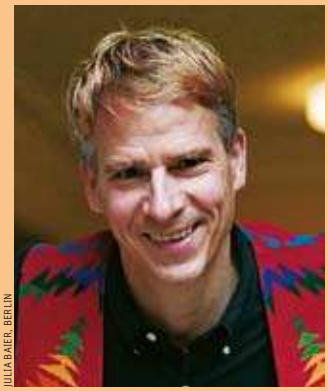
Quasars and galactic nuclei, a half-century agitated story. Von S. Collin in: AIP conference proceedings, Albert Einstein Century International Conference, Bd. 861, S. 587, 2006. http://arxiv.org/abs/astro-ph/0604560

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912783.

 Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

WIE GESCHIEHT BEWUSSTSEIN?

Die Hirnforscher Christof Koch und Susan Greenfield debattieren ihre Standpunkte zur Hirnaktivität bei Bewusstseinsprozessen.



JULIA BAIER, BERLIN

Christof Koch

Susan Greenfield

Christof Koch ist Professor für kognitive und Verhaltensbiologie am kalifornischen Institut für Technologie (Caltech) in Pasadena. Seit über zwanzig Jahren erforscht er die neuronalen Grundlagen von visueller Aufmerksamkeit und Bewusstsein.

Seine Ansicht:
Bei jedem Bewusstseinserlebnis feuert jeweils eine bestimmte, hierfür einzigartige Gruppierung von Nervenzellen aus festliegenden Hirnbereichen auf kennzeichnende Weise.

Susan Greenfield ist Professorin für Pharmakologie an der Universität Oxford, Direktorin der Royal Institution Großbritanniens (Gesellschaft zur Förderung und Verbreitung naturwissenschaftlicher Kenntnisse) und gehört dem britischen Oberhaus an. Sie erforscht Hirnmechanismen, so auch Hintergründe von neurodegenerativen Erkrankungen.

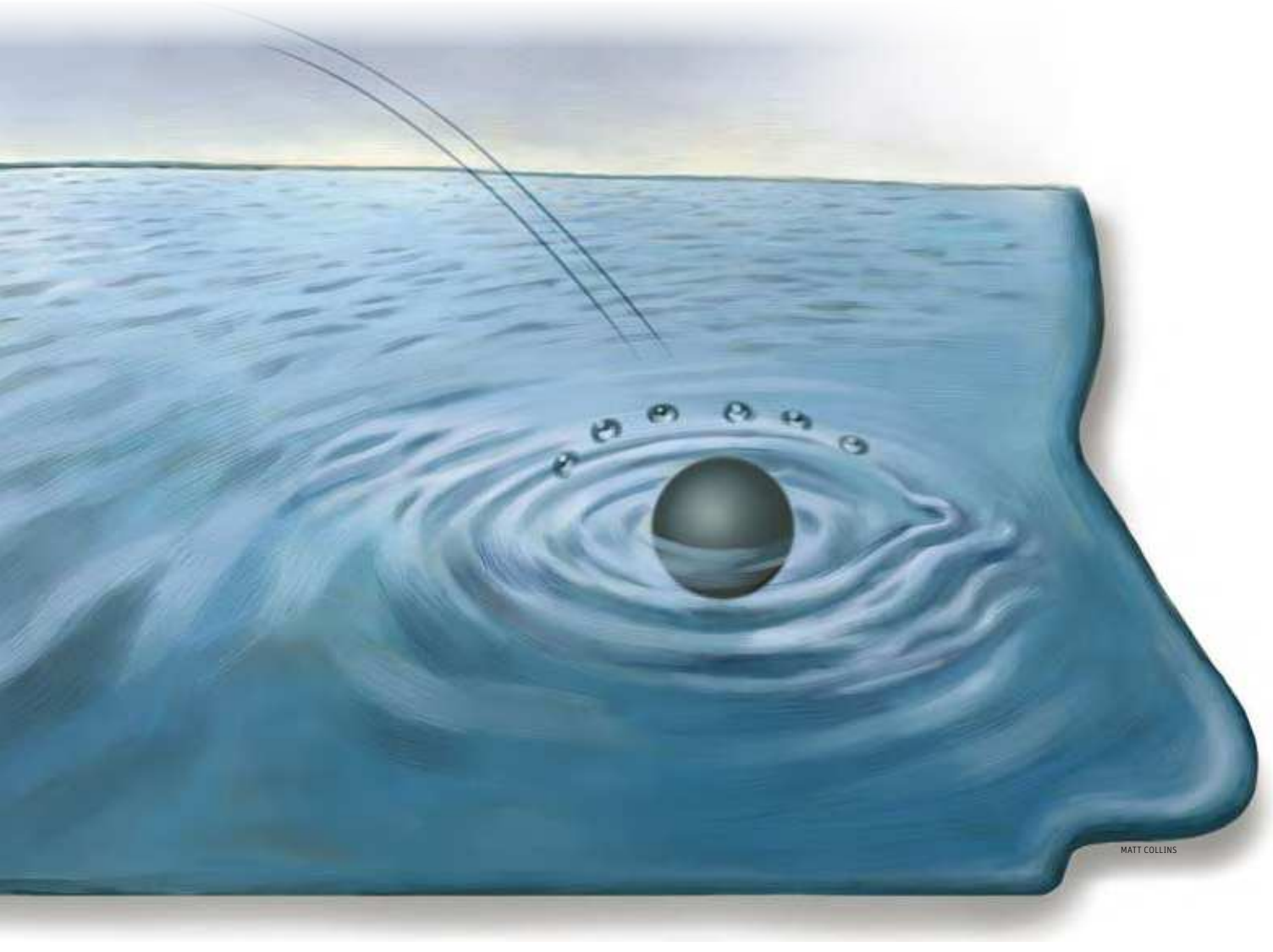
Ihre Ansicht:
Bei jedem Bewusstseinserlebnis feuern weit übers Gehirn verteilte Nervenzellen synchron in koordinierten Verbänden, die sich anschließend wieder auflösen.

Die Frage, wie aus Vorgängen im Gehirn Bewusstsein entsteht, gehört zu den schwersten in der Wissenschaft überhaupt. Forscher legen unser Gehirn bis in biochemische Feinheiten offen. Was direkt nach dem Urknall geschah, vermögen sie noch einigermaßen herzuleiten. Doch wie bewusstes Erleben zu Stande kommt, konnte noch niemand zufrieden stellend erklären.

Wir möchten helfen, dieses Rätsel zu entschlüsseln. In vielen Punkten sind wir einer Meinung. Das gilt für die Einsicht, dass die Frage nach dem Bewusstsein ganz unterschiedliche Phänomene und Aspekte berührt – die auch für sich untersucht werden müssen. Selbstbewusstsein ist einer davon, ein anderer der momentane Gehalt von Bewusstseinserlebnissen. Weitere betreffen den Bezug zwischen Bewusstsein und Hirnprozessen.

Wo könnte Forschung hier ansetzen? Noch wissen wir nicht, wie sich aus elektrischen und chemischen neuronalen Ereignissen Bewusstsein herausbildet. Also kommt es zunächst darauf an, überhaupt die neuronalen Korrelate zu bestimmen, die dem Bewusstsein am genauesten entsprechen: Es geht um die Hirnaktivität, die mit bestimmten Bewusstseinserlebnissen einhergeht. Jemand sieht einen Hund. Oder jemand fühlt sich plötzlich traurig. Was ist in der Sekunde im Gehirn geschehen? Zwischen welchen Neuronen hat sich da welcher Vorgang abgespielt? Wir beide wollen für solche subjektiven Erfahrungen das jeweilige physiologische Gegenstück finden, also das am besten dazu passende neuronale Korrelat. Jedoch kommen wir dabei zu unterschiedlichen Ansichten.

Bei allen Gegensätzen ist uns allerdings eine Grundlage gemeinsam: Beide beziehen wir unsere Ansichten hauptsächlich aus der Neurowissenschaft, weniger aus der Philosophie.

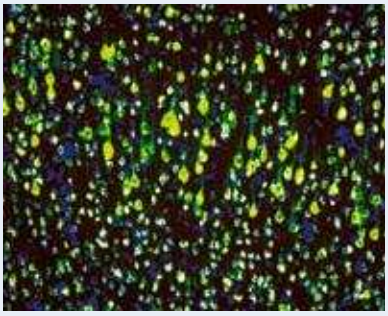


MATT COLLINS

Was ist das neuronale Korrelat?

Was passiert im Gehirn, wenn man etwas bewusst erlebt? Zum Beispiel einen Hund sieht, eine Stimme hört oder sich plötzlich traurig fühlt?

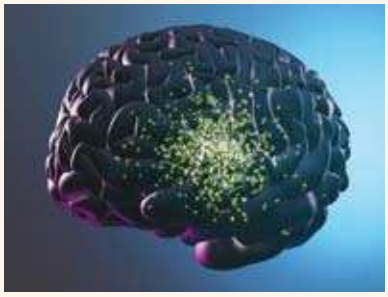
KOCH: So genannte Pyramidenzellen aus verschiedenen Bereichen des Cortex feuern im Verein – in Koalition –, je nach Ereignis auf einzigartige Weise. Dieser Neuronentyp verbindet weit entfernte Gebiete durch lange Ausläufer. Unterschiedliche Zusammenschlüsse von Neuronen repräsentieren verschiedenartige Sinnesreize (linkes Bild). Pyramidenzellen aus der Schicht V in der Großhirnrinde einer Maus leuchten grün/gelb, die umgebenden nichtneuronalen Zellen blau (rechtes Bild).

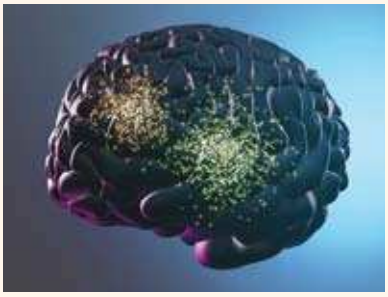


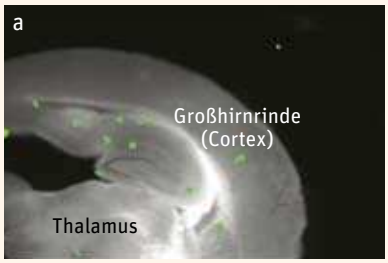
GEHIRNILLUSTRATIONEN: ALFRED T. KAMAJIAN

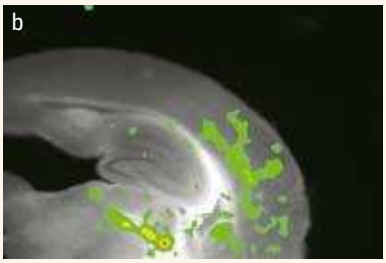
FOTO: STUART C. SEALFON UND POKMAN CHAN, MSSM

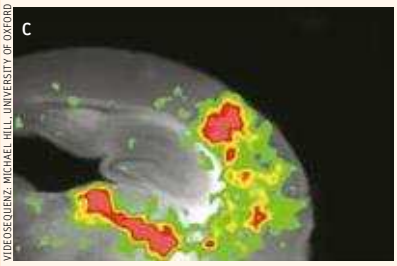
GREENFIELD: Nervenzellen aller möglichen Hirnregionen feuern synchron (grün), bis ein zweiter Reiz zur Bildung eines anderen synchron aktiven Nervenzellverbands führt (rot). Immer wieder finden sich neue Zellensembles und lösen sich wieder auf. In diesem Gehirn einer Ratte (unten) entsteht ein Zellverband in der Großhirnrinde (a, b), erreicht den Höhepunkt neuronaler Aktivität (c) und zerfällt wieder (d) – alles innerhalb von 0,35 Sekunden nach elektrischer Reizung des Thalamus.

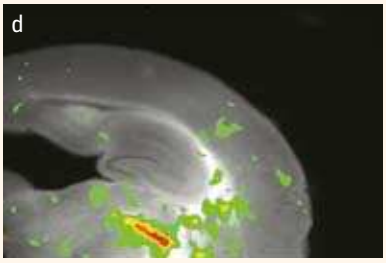












VIDEOSEQUENZ: MICHAEL HILL, UNIVERSITY OF OXFORD

STANDPUNKT VON CHRISTOF KOCH

Spezifische Neuronengruppen begleiten Bewusstseinserlebnisse

Susan Greenfield wie auch ich suchen nach den neuronalen Korrelaten für Bewusstsein. Sollten wir die richtigen Entsprechungen wirklich finden, ließe sich dann im Sinn von Ursache und Wirkung nach Mechanismen forschen, die das Phänomen Bewusstsein direkt hervorbringen.

Ich selbst beschäftige mich seit 1988 mit dem Thema, als der britische Biochemiker Francis Crick (1916–2004), einer der Entdecker der DNA-Struktur, und ich uns gemeinsam dieser Forschung zuwandten (siehe unseren Artikel in: Spektrum der Wissenschaft, 11/1992, S. 144). Meines Erachtens gehört zu jedem bewussten Wahrnehmen oder Erleben eine dafür spezifische Gruppierung – ich nenne es eine Koalition – von Nervenzellen, die sich dabei stets in bestimmter Weise verhält. Auf diese Art existiert ein einzigartiges neuronales Korrelat dafür, etwa einen roten Fleck bewusst zu sehen. Eine andere Gruppierung tritt in Aktion, wenn man seine Großmutter bewusst wahrnimmt, wieder eine andere arbeitet, wenn man wütend wird. Löst sich das Korrelat auf oder verändert es sich, verschwindet oder wandelt sich auch das Bewusstseinserlebnis.

Als physiologisches Substrat für ein Bewusstseinskorrelat ist ein Verbund so genannter Pyramidenzellen anzunehmen, die in der Großhirnrinde liegen und mit langen Ausläufern über weite Strecken hinweg kommunizieren. Von ihnen mag es in unserem Gehirn 50 oder auch 100 Milliarden geben. Vielleicht genügen für einen Bewusstseinsverbund schon eine Million davon. Nehmen wir an, ich befinde mich in einem Raum voller Menschen und Susan kommt herein. Ich sehe ihr Gesicht und im selben Augenblick stimmt eine Koalition von Zellen in meiner Hirnrinde einen Chor an – vielleicht agieren sie nur für einen Sekundenbruchteil synchron. Die Teilnahme reicht von Zellen der hinteren Hirnrinde, wo visuelle Reize zuerst verarbeitet werden, bis zur vorderen Rinde, die das Gesehene zuordnet und Handlungen plant.

Falls ich das Gesehene beachte, kräftigt das den Zellverband und der Gleichklang der Zellen wird stärker. So bleibt diese Zellgruppierung für eine gewisse Zeit bestehen und unterdrückt konkurrierende Zellverbände. Währenddessen schicken die zugehörigen Neuronen ihre Signale zwischen vorderen und

hinteren Rindengebieten hin und her. Da ruft mich plötzlich jemand – sofort formiert sich in der Hörrinde eine andere Koalition. Diese neue Gruppe beginnt ihrerseits mit Zellen in der vorderen Rinde zu kommunizieren. Meine Aufmerksamkeit wendet sich der gehörten Stimme zu – die vorherige Gruppierung wird nun unterdrückt. Vor meinem Bewusstsein verblasst Susans Gesicht.

Nervenzellen treten in einer Unzahl von Formen und Funktionen auf, verknüpft über vielfältige Verschaltungsmuster. Diese Vielfalt spiegelt sich auch bei den Bewusstseinskorrelaten. Damit sind wir beim Kernpunkt unserer Meinungsverschiedenheit. Ich glaube nicht, dass Bewusstsein eine irgendwie holistische Eigenschaft des Gesamtgehirns ist, also etwas, das einfach entsteht, wenn eine Riesenmenge von Neuronen in einer Lösung voller neuronaler Botenstoffe badet. Nach meiner Überzeugung vermitteln – oder erzeugen vielleicht sogar – spezielle Zellgruppen jeweils eigene Bewusstseinserlebnisse.

Schon bald werden Hirnforscher nicht nur feststellen, dass ein Bewusstseinszustand mit einer bestimmten allgemeinen Hirnaktivität korreliert. Sie untersuchen zunehmend das Verhalten ganzer Neuronenpopulationen und ihre Kausalbeziehungen. Damit würde klar, welche Zellpopulation für einen bestimmten Bewusstseinszustand verantwortlich ist.

Kaschierende Lichtblitzgewitter

Nur, wie soll man erkennen, welche bestimmte Zellgruppe eine bewusste Wahrnehmung bedingt? Und auf welche Aktivitätsmuster kommt es an? Sind stets sämtliche Pyramidenzellen der Großhirnrinde einbezogen? Oder besteht das Bewusstseinskorrelat nur aus einem Teil jener Zellen, die mit ihren langen Ausläufern zwischen Stirn und hinterem Gehirn vermitteln? Und partizipieren Neuronen von praktisch beliebigen Hirnregionen?

Viele Forscher konzentrieren sich auf die visuelle Wahrnehmung. Psychologen entwarfen raffinierte Experimente, um visuelle Reize vor dem Bewusstsein zu verstecken. Zum Beispiel entdeckten Naotsugu Tsuchiya und ich 2005, wie man Bilder mittels eines Lichtblitzgewitters verbergen kann: Auf das eine Auge fällt ein kleines stehendes Bild, vielleicht ein blasses, graues und wütendes Gesicht. Vor dem anderen erscheint in immerzu wechselnden Farben ein Lichtblitzgewitter. In dieser Situation merkt die Versuchsperson nicht, dass sie zugleich noch ein Bild sieht – obwohl Zellen in der Sehrinde im Hinterkopf massenhaft darauf ansprechen. Der Versuch lässt sich über Minuten ausdehnen. Sobald die Testperson aber das andere Auge zukneift, erkennt sie das Gesicht deutlich. Warum drang das Bild vorher nicht ins Bewusstsein? Susan Greenfield kann dies mit ihrem Modell schwerlich erklären, denn ihrer Ansicht nach handelt es sich stets um ein Bewusstseinskorrelat, wenn nur genügend viele Hirnzellen im Gleichtakt feuern.

Zur Arbeitsweise von Bewusstsein haben Francis Crick und ich verschiedene Ideen eingebracht, die sich alle auf experimentelle Daten

Wie macht der Wecker wach?

Warum können uns starke Sinnesreize aufwecken? Werden dadurch spezifische Hirngebiete aktiviert – oder das Gehirn als Ganzes?

BRIAN CRONIN

KOCH: Bei plötzlichem Lärm reagieren Neuronen eines Kerns im Hirnstamm. Daraufhin schicken sie Signale bis in den Thalamus und die Großhirnrinde. Andere Nervenzellen verbreiten im Gehirn den neuronalen Botenstoff Acetylcholin. Das alles erregt die Großhirnrinde und anhängende Strukturen. Nun errichtet eine Auswahl von Neuronen für Sekundenbruchteile einen engen, durch periodische Rückkopplung stabilen Verband. Daran nehmen Zellen der Hörrinde teil sowie deren Zielzellen in der vorderen Hirnrinde und Zellen der mittleren Schläfenlappen, die bei Planung und Gedächtnisbildung eine Rolle spielen.

GREENFIELD: Jeder starke Sinnesreiz, auch helles Licht, kann aufwecken. Somit ist dafür kein bestimmtes Hirngebiet verantwortlich. Ein Wecker verhilft dazu nicht wegen seiner spezifischen Reizqualität, sondern wegen seiner Lautstärke, einer Quantität. Abhängig vom Bewusstseinsgrad formieren sich kurzlebige Zusammenschlüsse von gleichzeitig aktiven Neuronen. Der Umfang eines Verbands ändert sich immerfort. Er hängt davon ab, wie bereitwillig Zellen in einem bestimmten Augenblick mitmachen. Diese Bereitschaft hängt auch von der Reizstärke ab. Ein großer Stein, den man ins Wasser wirft, erzeugt stärkere Wellen als ein kleiner. Ein lautes Weckgeräusch – oder ein blendend helles Licht – ruft eher eine große Menge Neuronen zusammen. Je mehr Zellen teilnehmen, desto leichter wird man wach.

stützen. Wir denken uns, dass Pyramidenzellen der so genannten Schicht V der Hirnrinde Signale zu Pyramidenzellen eines anderen Gebiets senden, von denen sie ihrerseits direkt starke Impulse erhalten. Hierdurch könnte sich eine Rückkopplungsschleife ergeben, die so lange bestehen bliebe, bis eine andere Schleife auftritt, die sie wieder zum Schweigen bringt. Zu dieser Vorstellung würde passen, dass Bewusstseinserlebnisse länger anhalten als die paar Millisekunden, die ein Neuron feuert.

Diese Idee bestärkten kürzlich Arbeiten an genetisch veränderten Mäusen. Mehrere New Yorker Forscherteams unter Leitung von Stuart C. Sealfon von der Mount Sinai School of Medicine und Jay A. Gingrich von der Columbia-Universität zeigten, dass Halluzinogene – etwa LSD, Psilocybin und Meskalin – auf einen Rezeptor für den Signalstoff Serotonin wirken, mit dem Pyramidenzellen der Schicht V bestückt sind. Möglicherweise also verändern die Rauschmittel das Bewusstsein deswegen, weil sie einen bestimmten Rezeptortyp einer spezifischen Zellgruppe aktivieren – und nicht, weil sie unspezifisch Schaltkreise im gesamten Gehirn durcheinanderbringen. Ob das stimmt, ließe sich an den Pyramidenzellen austesten.

Weiterhin halten Crick und ich das Claustrum für bedeutsam, eine blattförmige Struktur tief in der Großhirnrinde. Dessen Zellen empfangen von fast allen anderen Rindenregionen Signale. Das Claustrum säße jedenfalls an einer idealen Stelle, wo sich Informationen aus den sensorischen Rindengebieten bündeln und zu einem einheitlichen Erlebnis zusammenfügen ließen. Um diese Ideen zu prüfen, müssten Forscher das Verhalten großer Mengen von Neuronen an vielen Orten im Gehirn gleichzeitig erfassen. Bisherige Versuche hierzu mit vielen ultrafeinen Elektroden deuten darauf hin, dass für ganz alltägliche Erlebnisse jeweils spezifische Zellgruppen bereitstehen.

Dagegen fehlt bisher jeder Hinweis darauf, dass Nervenzellen in einer Laborkultur so etwas wie ein Bewusstsein haben können, ob es nun ein paar hundert sind oder eine Million. Denn Hirnneuronen sind stets Teil riesiger organisierter Nervennetze. Nur in solch einem Kontext gelingt es ihnen, Bewusstsein hervorzubringen. Ein analoges Beispiel wäre, dass DNA-Moleküle zwar die Kodes für unsere Proteine tragen, diese aber ohne viele weitere Moleküle nicht hergestellt werden könnten.

Durch die Ausdehnung und Art der Nervenzellverbände dürften auch Unterschiede im Bewusstsein von Kindern und Erwachsenen sowie von Tieren zu erklären sein. Dass solche Zellkoalitionen überhaupt auftreten können, hängt aber in jedem Fall davon ab, dass im Hirnstamm und im Thalamus immerfort Erregungssignale aufkommen und die Hirnrinde von daher aktiviert wird. Hirnforscher sprechen von Aktivierungssystemen. Wenn diese Erregungssysteme schweigen – wie im Tiefschlaf, unter Narkose oder im tiefen Koma –, kommen auch keine gleichgeschalteten Koalitionen zu Stande. Der Mensch hat dann kein Bewusstsein.

Unser Modell lässt sich mit physiologischen Experimenten überprüfen, doch es hat einen Schwachpunkt: Es sagt nichts über Kriterien für Bewusstsein, also welche Systeme ein bewusstes Erleben haben. Uns fehlt noch eine Theorie, mit der wir gestützt auf physiologische Daten vorhersagen können, wo solches Erleben womöglich auch auftritt: bei Fliegen, Hunden, Ungeborenen, nicht ansprechbaren Alzheimerpatienten oder gar dem World Wide Web?

Masse reicht nicht

Zu den Forschern, die an solchen Theorien arbeiten, zählt Gulio Tononi von der Universität von Wisconsin in Madison. Allerdings ist unser Wissen über das Gehirn noch so dürftig, dass wir über ein spekulatives Stadium bisher nicht hinaus sind. Uns helfen aber schon Hypothesen, die sich mit heutiger Technik testen lassen. Francis Crick betonte gern, dass James Watson und er 1953 die Doppelhelixstruktur der DNA nicht durch reines Nachdenken fanden, sondern durch Auswertung von experimentellen Daten.

Im Kern besagt meine Auffassung: Bewusstsein verdankt sich nicht der Quantität neuronaler Aktivitäten, sondern deren Qualität. Nicht die Menge der mitwirkenden Neuronen zählt, wie Susan Greenfield glaubt. Vielmehr kommt es auf die von den Zellen repräsentierte Komplexität von Informationen an. Jede bestimmte Bewusstseinserfahrung erfordert ihr spezifisches Neuronennetz. Es genügt eben nicht, wenn eine große Menge beliebiger Zellen heftig feuert. Ein volles Bewusstsein umfasst außerdem zugleich Zellen der hinteren und der vorderen Großhirnrinde – nämlich sowohl aus Gebieten für Sinneseingänge als auch aus Regionen für Gedächtnis, Planung und Sprache.

Das Gehirn funktioniert in der ihm eigenen Weise nicht kraft Masse, sondern wegen der so unglaublich spezifischen besonderen Verschaltungsmuster seiner Neuronen. Darin steckt zugleich all die Information, die jemand in seinem Leben gelernt hat, wie die Information seiner Gene, die sich in seiner langen Abstammungsgeschichte ansammelte. Entscheidend ist nicht, wie viele Nervenzellen gleichzeitig aktiv sind. Die richtigen Neuronen müssen feuern. ◁

STREITFRAGEN

Beide Kontrahenten nehmen an, dass bei einem Bewusstseinserlebnis synchron aktive Neuronenensembles – Nervenzellkoalitionen – auftreten.

Jedoch:

- ▶ Müssen das spezifische Zellgruppen sein?
- ▶ Müssen spezifische Hirngebiete mitwirken?
- ▶ Oder kommt es rein auf die Menge erregter Zellen an?
- ▶ Ist Bewusstsein Ausdruck holistischer Funktionen?

STANDPUNKT VON SUSAN GREENFIELD

Bewusstsein ist ein ganzheitliches, quantitatives Geschehen

Gäbe es zum Bewusstsein nichts weiter an neuronalen Korrelaten, als dass sich jeweils bestimmte Neuronen entladen – wie Christof Koch vorschlägt –, dann befände sich dieses in den Hirnneuronen selbst. Über besondere Qualitäten der betreffenden Zellen oder Hirnregionen im Vergleich zu anderen lässt sich mein Kollege nicht aus. Wenn überdies angeblich selbst eine Million Zellen kein Bewusstsein hervorbringt, sofern diese Neuronen nicht zu riesigen Netzen gehören, dann verlagert sich die Fragestellung: Statt nach dem Korrelat von Bewusstsein zu suchen, erforscht man die Eigenart jener Netzwerke.

Koch befleißigt sich einer modernen Phrenologie, wenn er sagt, für Bewusstseinsformen existierten jeweils spezifische Neuronenverbände. Früher einmal glaubten Forscher tatsächlich, dass die einzelnen Hirnfunktionen in bestimmten Gebieten sitzen. Bei all seiner Begeisterung für die Großhirnrinde müsste es Koch eigentlich zu denken geben, dass eben diese Struktur vielen Tieren, so Vögeln, fehlt, die dennoch offensichtlich über Bewusstsein verfügen. Aber selbst wenn eine räumliche Zuordnung gelänge, könnte das nicht erklären, wie Bewusstsein zu Stande kommt.

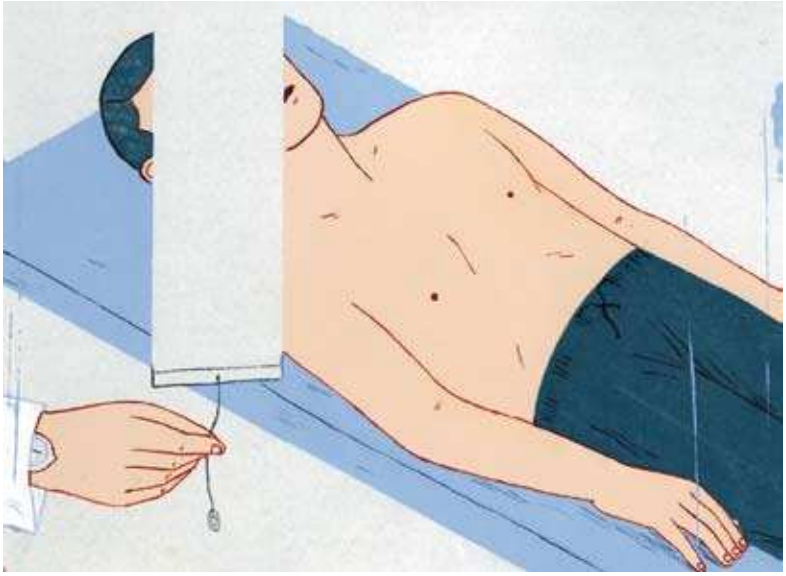
Nach meiner Ansicht gibt es nicht getrennte, nebeneinander ablaufende Bewusstseinserlebnisse. Denn visuelle Reize können den Höreindruck verändern und umgekehrt. Dass Wahrnehmungen mehrerer Sinneseingänge verschmelzen, spricht gegen ein eigenes visuelles Bewusstsein. Vor allem gilt: Entweder ist man bei Bewusstsein oder man ist es nicht. Kochs Versuchspersonen waren stets bei Bewusstsein. Folglich wurde nicht dieses selbst manipuliert, sondern nur sein Inhalt. Solche Experimente untersuchen darum höchstens die Aufmerksamkeit, nicht das Bewusstsein. Meines Erachtens kommen wir besser an ein Bewusstseinskorrelat heran, wenn wir nach Unterschieden zwischen bewussten und nicht bewussten Zuständen fragen.

Meine Ausgangsthese: Es gibt nicht bestimmte Hirnregionen oder Neuronengruppen mit magischen Eigenschaften für Bewusstsein. Vielmehr müssen wir einen speziellen Prozess suchen. Das Korrelat muss diverse Phänomene erklären helfen – so den Effekt eines Weckers, einer Narkose, den Unterschied zwischen Wachen und Träumen, Selbstbewusstsein, auch den Kontrast zwischen menschlichem und tierischem Bewusstsein sowie möglicherweise das Bewusstsein eines ungeborenen Kinds. Statt auf die Qualität abzuheben, sollte man an Quantität denken, an einen holistischen Prozess. Das Phänomen tritt auf, indem das Gehirn ganzheitlich in seinen Funktionen zunimmt. Bewusstsein wächst, wenn das Gehirn an Größe gewinnt.

Was ist nun der Schlüsselmechanismus? Dass es sich um einen Vorgang handelt, zeigen

WIE FUNKTIONIERT EINE NARKOSE?

Wirken Narkotika, weil sie generell die Hirnaktivität dämpfen – oder verhindern sie, dass sich in bestimmten Hirnregionen Zellensembles bilden?



BRIAN CRONIN

KOCH: Früher dachten Wissenschaftler, Narkosemittel würden mit Fetten in den Zellmembranen von Neuronen wechselwirken. Doch die Stoffe binden sich, je nach Narkotikum, an bestimmte Membranproteine und beeinträchtigen so verschiedene neuronale Vorgänge. Dabei schaltet nicht ein einzelner, spezieller Mechanismus das Bewusstsein aus. Zu den wichtigsten Folgen gehört aber, dass in weiten Hirngebieten über die Synapsen (Kontaktstellen zwischen Neuronen) Hemmung verstärkt und somit Erregung vermindert wird. Die Zellaktivität hört nicht völlig auf. Jedoch können die Neuronen kaum mehr stabile, synchron aktive Verbände bilden. Wenn Zellen aus vorderen und hinteren Hirnpartien nicht im Chor kommunizieren können, ist Bewusstsein nicht möglich.

GREENFIELD: Narkosemittel unterdrücken die Nervenzellaktivität in Bereichen des gesamten Gehirns. Sie beeinträchtigen die Eigenschaft des holistisch funktionierenden Gehirns, synchron aktive Nervenzellensembles hervorzubringen. Narkotika bewirken, dass die Ensembles schrumpfen. Der Bewusstseinsgrad nimmt immer mehr ab, bis Bewusstlosigkeit eintritt. So wären auch Übergangszustände wie Übererregbarkeit und Delirium zu erklären. Meiner Meinung nach erinnert das an Menschen mit zu schwach ausgeprägten Nervenzellkontakten, die deswegen recht kleine Verbände herstellen: Sie geben sich oft übermäßig emotional und wenig verstandesgeleitet.

unter anderem die Arbeiten von Wolf Singer vom Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt. Er und seine Mitarbeiter entdeckten, dass eine große Anzahl Neuronen, vom Thalamus bis in die Großhirnrinde, plötzlich für ein paar kurze Augenblicke gleichzeitig mit einer Frequenz von 40 Hertz synchron feuert. Gleiches kann sich allerdings auch ereignen, wenn sich dieses Gewebe in einer Kulturschale befindet. Was muss für Bewusstsein noch hinzukommen? Welche weitere Bedingung muss erfüllt sein?

Der kolumbianische Neurowissenschaftler Rodolfo Llinas von der New-York-Universität meint, die kurze synchrone Aktivität baue zwischen Thalamus und Rinde zwei einander ergänzende Schleifen auf, die zusammen ein Bewusstsein unterhalten: ein »spezifisches« System für den Inhalt, ein »unspezifisches« für Wachsein und Aufmerksamkeit. So ließe sich in der Tat begründen, wieso ein lauter Wecker volles Bewusstsein wachruft. Im Übrigen unterscheidet Llinas zwischen Traum- und Wachbewusstsein. Beim Träumen soll nur die erste Schleife funktionieren. Die zweite erhält von außen keinen Input, weil von dort keine Sinnessignale ankommen.

Leider nehmen Modelle wie diese für das Gehirnkorrelat nur zwei Zustände an, gemäß einem Alles-oder-nichts-Prinzip. Dass das Bewusstsein in Wahrheit variiert, ständig zu- und abnimmt, beschreiben sie nicht. Deswegen bevorzuge ich ein anderes Modell, das von einem mehr wandelbaren Zustand ausgeht. Seit über zehn Jahren wissen wir nun, dass viele Millionen Zellen einige hundert Millisekunden lang gleichzeitig – als »Ensemble« – aktiv sind und ihr synchrones Verhalten dann sogleich wieder erlischt. Die räumlichen und zeitlichen Muster, mit denen sich die Ensembles immerfort ändern, entsprechen genau dem, was für Bewusstseinserlebnisse erforderlich wäre. Dauernd bilden sich weit reichende Koalitionen, lösen sich augenblicklich wieder voneinander und neue finden sich. Jede Koalition ist einmalig. In meinem Modell gibt es darum einen Bewusstseinsgrad – und dieser ändert sich alle Augenblicke. Der momentane Grad korreliert damit, wie viele Zellen gerade in ein Ensemble eingespannt sind.

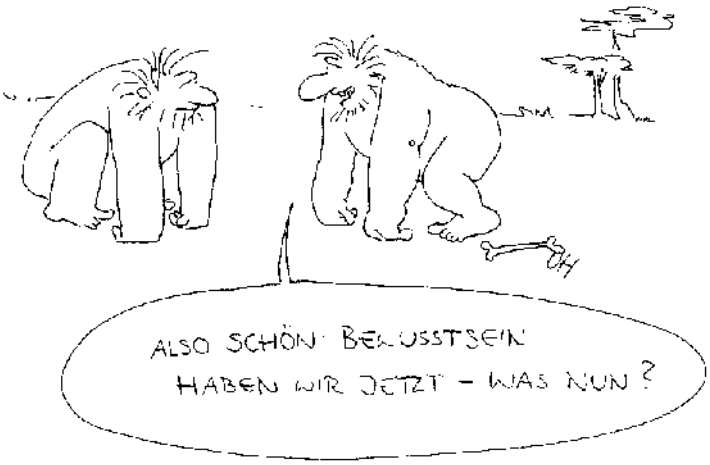
Damit wären alle oben aufgezählten Phänomene abgedeckt. Lautes Weckerrasseln stellt einen heftigen sensorischen Reiz dar und ruft ein großes, synchron aktives Neuronenensemble hervor. Beim Träumen treten auf Grund der vergleichsweise schwachen Stimuli aus dem Körperinnern nur ziemlich kleine Zellverbände auf, im Wachzustand entstehen wegen der stärkeren Sinneseindrücke größere. Narkosemittel wiederum schränken die Ensemblegröße dermaßen ein, dass das Bewusstsein schwindet. Selbstbewusstsein vermag erst in einem Gehirn von ausreichender Größe und mit genügend Verschaltungen für ausgedehnte Netze aufzukommen. Und der Bewusstseinsgrad, den Tiere erreichen, ergibt sich jeweils aus der Größe der neuronalen Ensembles. Das gilt ebenso für menschliche Feten.

Hirngröße ist wichtig

Wohlgemerkt wollen weder Christof Koch noch ich mit unseren Modellen erklären, wie letztlich Bewusstsein entsteht. Was der australische Philosoph David Chalmers als die eigentliche – harte – Frage bezeichnete, klammern wir erst einmal aus: nämlich wie sich physiologische Ereignisse in ein persönliches Bewusstseinserleben umsetzen. Beide suchen wir nur nach einem Korrelat. Wir möchten Hirnphänomene und subjektives Erleben aufeinander beziehen. Den entscheidenden Zwischenschritt lassen wir beiseite – die Frage, wie ein körperliches Phänomen Erleben bewirkt.

Die Nervenzellensembles schaffen nicht Bewusstsein. Sie zeigen vielmehr Bewusstseinsgrade an. Jedoch beruhen der Umfang der Zellverbände und entsprechend der Grad von Bewusstsein auf vielen physiologischen Faktoren, die im Experiment manipuliert werden können. Dazu gehören etwa Ausmaß und Art von neuronalen Verschaltungen, die Stärke eingehender Reize oder auch die Existenz anderer, konkurrierender Ensembles.

Koch kritisiert an meinem Ensemble-Modell, dass es mir allein auf Größe, auf Menge ankommt. Tatsächlich aber heißt Forschen meistens messen – nämlich etwas objektiv quantifizieren. Für Wissenschaft ist Größe darum alles. Andere Kollegen bemängeln, die Ensembles als solche seien zu vage gezeichnet. Hiergegen kann ich einwenden: Mehrere Forscher haben neuronale Mechanismen für kurzzeitige Ensemblebildung bereits recht detailliert beschrieben – so Amiram Grinvald vom Weizmann-Institut für Wissenschaft in Rehovot (Israel), Ole Paulsen von der Universität



Literaturhinweise:

Rätsel Ich. Gehirn, Gefühl, Bewusstsein. Andreas Sentker und Frank Wigger (Hg.). Springer/Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2007

Bewusstsein. Ein Neurobiologisches Rätsel. Von Christof Koch. Elsevier/Spektrum Akademischer Verlag, München 2005

A neuroscientific approach to consciousness. Von Susan A. Greenfield and T. F. T. Collins: Progress in Brain Research, Bd. 150, S. 11, 2005

The private life of the brain. Von Susan Greenfield. John Wiley & Sons 2000

Oxford und John G. Jefferys von der Universität Birmingham.

Bis wir dieses Modell am Menschen überprüfen können, müssen wir noch auf schärfere nichtinvasive Bildgebungsverfahren warten. Die zeitliche Auflösung muss in dem Millisekundenbereich liegen, in dem neuronale Ensembles zusammenkommen und wieder zerfallen. Dann müssten wir vorübergehende Zellverbände sehen können, die beispielsweise mit Schmerz, Schwermut oder Schizophrenie korrelieren. An Tieren liegen schon erste Beobachtungen vor. Im Jahr 2006 zeigten Toby Collins und andere meiner Mitarbeiter, wie Narkosemittel die Entstehung, Aktivität und Dauer von neuronalen Ensembles bei Ratten verändern. Auch scheint die Anzahl von Zellen, die in der sensorischen Hirnrinde in Ensembles aktiv ist, bei einer narkotisierten Ratte den Betäubungsgrad widerzuspiegeln. Wie mein Mitarbeiter Subhojit Chakraborty erkannte, ließe sich bei Nagern an Zellensembles des Seh- und Hörsystems vermutlich gut erforschen, wie Sehen und Hören gegeneinander ausgespielt werden.

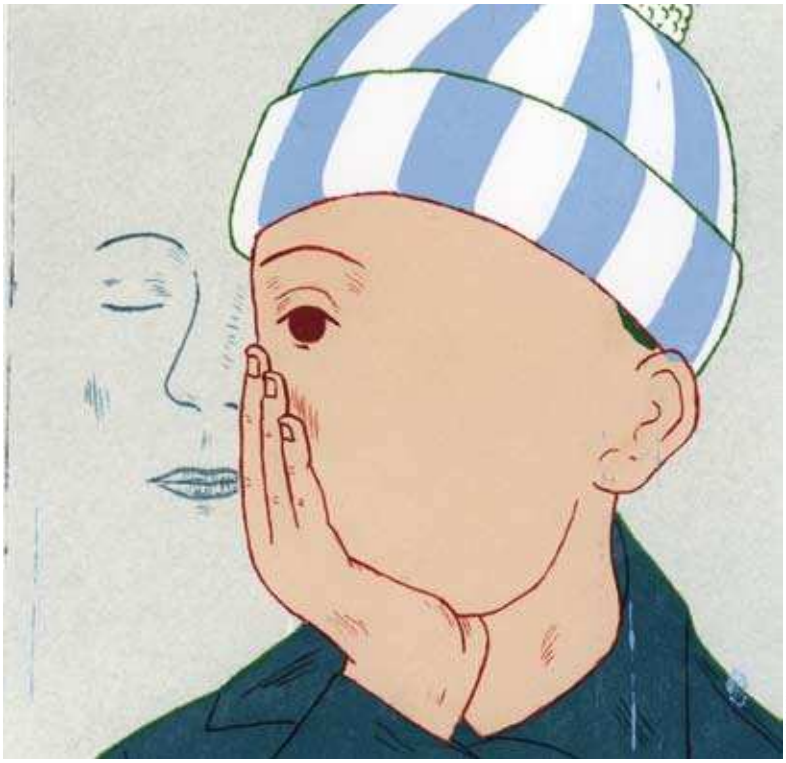
Andere Kritik gilt dem postulierten Verhalten der Zellverbände in Raum und Zeit. Angeblich widerspricht meinem Modell, dass bei Epilepsie eine anhaltende synchrone Aktivität gerade mit Bewusstseinsverlust einhergeht. Doch im Vergleich dazu sind die Bewusstseinskorrelate sehr schnelllebig. Epileptische Anfälle blockieren ja den normalen stetigen Wechsel des Geschehens im Gehirn. Ein einzelnes Ensemble bleibt dann viel zu lange bestehen. Wie Collins, Michael Hill, Eleanor Dommett und ich kürzlich schrieben, könnten auch Narkotika eine Blockade erzeugen.

Manche Kollegen vermissen bei meinem Modell die räumliche Zuordnung zu bestimmten Hirnregionen. Meines Erachtens nehmen wir es oft zu wichtig, Hirnprozesse zu lokalisieren. Auf Zentren für Hirnfunktionen kommt es wirklich nicht an, schon gar nicht beim Bewusstsein. Plausibler ist ein Szenarium, in dem viele verschiedene Hirnregionen ganz kurz bestehende Ensembles bilden. Zusammen ergibt das eine Mannigfaltigkeit in Raum und Zeit. Das können wir gegenwärtig experimentell noch nicht fassen, vielleicht aber irgendwann mathematisch modellieren.

Werden Forschungen über neuronale Korrelate eines Tages dazu verhelfen, die eigentliche, harte Frage anzugehen – wie denn nun durch physiologische Vorgänge bewusstes Erleben zu Stande kommt? Auf jeden Fall wird es so lange nicht gelingen, hier eine Lösung zu finden, wie wir uns nicht darüber klar sind, mit welchen Anhaltspunkten wir zufrieden wären: mit Hirnbildern, mit einer Ratte im Test, einem Roboter, einer Formel. Oder vielleicht würde es uns reichen, wenn wir erst den Bewusstseinszustand eines Menschen künstlich gezielt verändern könnten. Sagen wir, Christof Kochs Gehirn würde so manipuliert, dass er die Welt genauso erlebt wie ich – und mit mir einer Meinung ist. ◁

Wachsein und Träumen

Warum erleben wir Träume anders als Wacherlebnisse?



BRIAN CRONIN

KOCH: Zwar ist das Gehirn in Schlafphasen mit schnellen Augenbewegungen hochaktiv, wenn wir anscheinend lebhaft träumen. Die Aktivität verteilt sich aber anders als beim Wachsein. Intensiv arbeitet beim Träumen das limbische System (das vereinfacht gesagt für Gefühle und Gedächtnis zuständig ist). Bereiche der Stirnlappen für rationales, vernunftbetontes Denken sind dagegen unterdrückt. Auch beim Träumen bilden Neuronen synchron aktive Verbände. Diese rekrutieren sich aber teils aus anderen Hirngebieten. Im Wachzustand nehmen viel mehr Zellen der präfrontalen Rinde teil, wo Nachdenken und Vernunft auf Wahrnehmungen treffen. Das könnte erklären, warum Träume oft wirr und gefühlsbeladen sind.

GREENFIELD: Beim Träumen formieren sich höchstwahrscheinlich viel kleinere Zellensembles als im wachen Zustand – was daran liegen dürfte, dass jetzt starke Außenreize fehlen, die viele Neuronen beschäftigen. Im Traum treibt allein spontane Hirnaktivität den Zusammenschluss von recht flüchtigen Zellverbänden an. Weil das Gehirn nun kein äußeres Geschehen aufnimmt, bilden sich auch nicht in gleicher Weise aufeinander bezogene, miteinander verkettete vorübergehende Neuronengruppierungen. Beziehungen zwischen Nervenzellverbänden sind allenfalls zufällig und oft seltsam. Deswegen können wir das Traumgeschehen so schlecht kontrollieren.

MUSKELKATER

Katerstimmung im Sportlerbein

Winzige Verletzungen verursachen nach ungewohnter körperlicher Anstrengung den gefürchteten Schmerz.

Von Stefanie Reinberger

Sport ist gesund, heißt es. Doch warum fühlt er sich oft nicht so an? Ob ein schlechtes Gewissen uns antreibt, die Laufschuhe zu schnüren, ob der erste Schneefall uns auf die Piste lockt: Am nächsten Morgen fällt das Aufstehen schwer. Die Muskeln schmerzen, wir haben einen »Muskelkater« – und der kann bis zu eine Woche anhalten.

Als Verursacher galt lange Zeit die Milchsäure. Sie entsteht bei so genannter anaerober Belastung, wenn also zu wenig Sauerstoff für die Energiegewinnung zur Verfügung steht. Dann setzen Muskelzellen den Einfachzucker Glukose über mehrere Stufen in das Zwischenprodukt Milchsäure um und gewinnen so den Energieträger ATP (Adenosintriphosphat).

Schon seit den 1980er Jahren gilt diese Hypothese jedoch als überholt. Denn Milchsäure entsteht bei Untrainierten wie bei Geübten. Letztere bleiben aber meist vom Kater verschont. Ein weiteres Argument gegen den vermeintlichen Übeltäter: Besonders viel Säure bildet sich bei schnellen Bewegungen, die über einen kurzen Zeitraum viel Energie erfordern – etwa beim 400- Meter-Lauf. Doch Sprinter leiden kaum unter Muskelkater.

Der Berliner Sportmediziner Dieter Böning hat zwei Muskelkatertypen definiert: Der häufigere Typ 1 entsteht durch mechanische Überlastung, den Typ 2 verursacht eine Überforderung des Muskelstoffwechsels.

Einen Abstieg wird ein Bergwanderer noch eine Weile in den Gliedern spüren, während der anstrengendere Aufstieg oftmals folgenlos bleibt. Ein klassisches Experiment zu diesem Typ-1-Muskelkater stammt aus Skandinavien. Im Jahr 1956 ließ der dänische Sportphysiologe Erling Asmussen Probanden einen Stuhl bis zur Erschöpfung hinauf- und hinabsteigen – mit dem einen Bein hoch, mit dem anderen wieder hinunter. Das Ergebnis: Zwar ermüdete das »Bergbein« schneller, unter Muskelkater litt aber das andere.

Muss das Gewicht nach oben gehievt werden, aktiviert unser Nervensystem nämlich viele Muskelfasern, die sich die Arbeit teilen, beim Absteigen hingegen kommen sehr viel weniger zum Einsatz, um den quasi nach unten fallenden Körper aufzufangen. Zudem erfährt der Muskel bei der Abwärtsbewegung eine Dehnung, der er durch Kontraktion entgegenwirken muss, um zu bremsen. Mikroskopisch feine Verletzungen sind die Folge der Überlastung. Trainierte Bergsteiger leiden darunter allerdings deutlich weniger, denn ihr Körper hat gelernt, auch in der kritischen zweiten Bewegungsphase mehr Muskelfasern zu aktivieren.

Je detaillierter wir diese betrachten, desto deutlicher wird ein komplexer hierarchischer Aufbau. Die unterste Ebene bilden dabei Eiweißfäden aus den Proteinen Aktin und Myosin, die für die Kontraktion benötigt werden, sowie Titin, das die Muskeleinheiten wie ein Gummiband zusammenhält. Diese Fäden, fachlich als Filamente bezeichnet, sind die Arbeitstiere eines Muskels. Sie bilden als nächsthöhere Organisationseinheit ein »Sarkomer« (von griechisch *sarkós* für Fleisch und *-mer* für Teil). Hunderte davon hintereinander geschaltet ergeben eine »Fibrille«, diese wiederum bauen, parallel arbeitend, eine Muskelfaser auf.

Begrenzt wird ein Sarkomer durch die Z-Scheiben, in denen die Aktinfilamente verankert sind. Mit dem Elektronenmikroskop lässt sich zeigen, dass diese Strukturelemente nach ungewohnter oder übermäßiger Belastung bei zwanzig bis dreißig Prozent der Muskelfasern beschädigt sind.

Doch den Muskelkater rufen solche Mikroschäden nicht direkt hervor, denn obwohl sie unmittelbar nach der Kontraktion auftreten, meldet sich der Schmerz erst später. Vermutlich wird er durch einen höheren Druck im Gewebe ausgelöst, Folge von verstärktem Eiweißabbau und Schwellungen. Beeinträchtigen Letztere zudem die Durchblutung, kann das den Kater verstärken.

Auch die beschädigten Z-Scheiben sind nur ein Teil der Wahrheit. Muskelbiopsien nach Marathonläufen zeigen nämlich: größtenteils intakte Z-Scheiben, hingegen zerstörte Filamente, Zellmembranen und funktionelle Zellbestandteile wie die Energie liefernden Mitochondrien oder das sarkoplasmatische Retikulum, ein Kalziumspeicher in den Muskelzellen. Eine erhöhte Zahl von Leukozyten und Erythrozyten, also weißen und roten Blutkörperchen, ließ auf Entzündungsprozesse schließen. Die Ursachen dieser Phänomene sind bislang nicht geklärt.

Die gute Nachricht zum Schluss: Egal woher Mikroschäden und damit der Schmerz rühren, der Muskel regeneriert sich am Ende wieder. Und auch wenn bislang kein Kraut gegen den Kater gewachsen ist: Lindern können Sie ihn etwa durch warme Bäder oder Saunabesuche, Einreiben mit durchblutungsfördernden Mitteln wie Franzbranntwein oder sanfte Bewegung.

Die Biologin **Stefanie Reinberger** ist freie Wissenschaftsjournalistin und lebt in Heidelberg.

▶ Ausdauersportarten wie Joggen, Nordic Walking oder Bergwandern erfreuen sich großer Beliebtheit. Sie setzen einen gesunden Kontrapunkt gegen Alltagsstress und Bewegungsmangel – sofern mit Verstand betrieben. Der Kater danach ist keineswegs ein Beweis für effektiven Sport, sondern ein Indiz für mikroskopische Verletzungen der muskulären Feinstruktur. Falscher Ehrgeiz schadet nur.

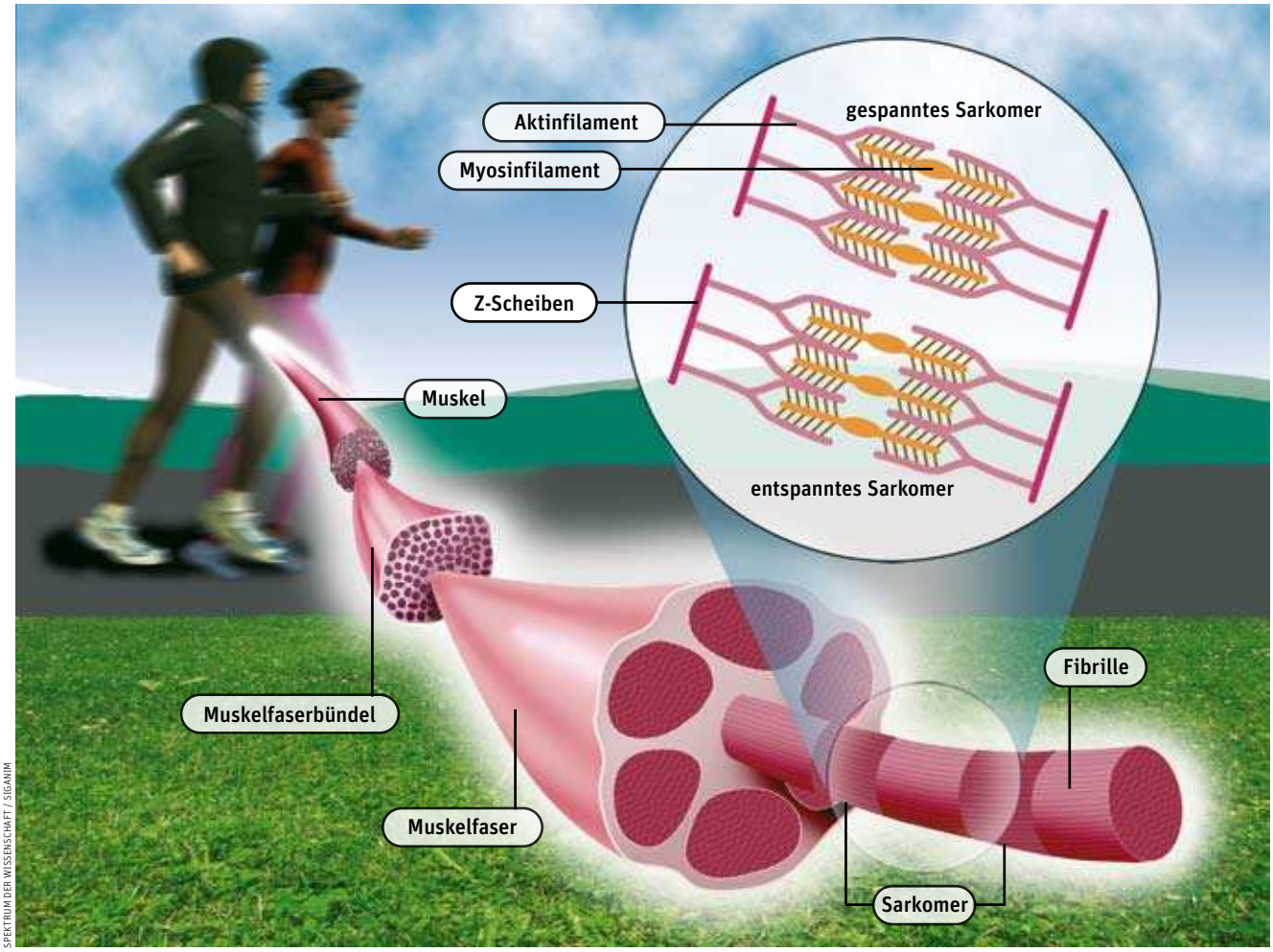
Wussten Sie schon?

▶ **Der Begriff »Muskelkater«** entstand vermutlich – ähnlich wie auch der »Kater« nach übermäßigem Alkoholkonsum – durch eine Verballhornung des Wortes »Katarrh« (von griechisch *katarrhein*, herunterfließen), das eigentlich eine Entzündung der Schleimhäute mit Flüssigkeitsabsonderung bezeichnet.

▶ **Wer vor dem Sport** die Durchblutung und damit die Funktionsfähigkeit des Muskels nicht durch ein kurzes Aufwärmtraining steigert oder wer es mit dem sportlichen Eifer schlicht übertreibt, muss mit Verletzungen rechnen. Insbesondere Ballsportarten mit ihren abrupten Beschleunigungs- und Abbremsphasen sind risikoreich – die Muskeln müssen durch extrem schnelle Kontraktion Belastungsspitzen auffangen. Wird das Gewebe überdehnt, kann eine Zerrung erfolgen. Zwar ist die Struktur des Muskels noch intakt, doch er steht unter zu hoher Spannung. Für einen längeren Zeitraum heißt es nun Pausieren, Kühlen, Bandagieren und Hochlagern. Bei noch stärkerer Belastung oder Belastung eines bereits vorgeschädigten Muskels können einzelne Fasern, Bündel oder gar der ganze Muskel reißen. Blutung und Blutergüsse im Gewebe gehen damit einher. Ein ausgeprägter Muskelfaserriss lässt sich von außen als »Delle« erkennen.

▶ **Sauerkirschsaft soll gegen Muskelkater helfen** – das ergab zumindest eine kleine amerikanische Studie aus dem Jahr 2006. Die Wissenschaftler verabreichten einem Teil ihrer Probanden drei Tage vor und vier Tage nach dem Training zweimal täglich je 0,34 Liter mit Apfelsaft verdünnten Kirschsaft. Siehe da, die Probanden klagten über weniger Schmerzen als ihre Mitstreiter, die lediglich ein mit Farbstoffen versetztes Placebogetränk genossen hatten. Außerdem sank die Leistungsfähigkeit der Muskeln bei den Kirschsaftkonsumenten nach dem Sport nur um rund vier Prozent, während die Teilnehmer der Kontrollgruppe rund 22 Prozent Einbußen verzeichnen mussten. Den Effekt führten die Wissenschaftler auf Antioxidantien und entzündungshemmende Stoffe im Kirschsaft zurück.

▶ **Dehnen fördert die Beweglichkeit, schützt aber nicht** vor Muskelkater, wie australische Wissenschaftler 2002 ermittelten. Schlimmer noch: Entstanden beim Training Mikroverletzungen, können sich diese durch Dehnübungen noch verstärken. Und als wären das nicht schon genug schlechte Nachrichten: Sind die Muskeln vor dem Sport noch kalt, also noch wenig durchblutet, kann Stretching selbst Verletzungen hervorrufen. Wie so oft lautet die Devise: Auf die Dosis kommt es an.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

Die Macht der Riboschalter

Bislang übersehene Kontrollelemente der Boten-Ribonukleinsäure verleihen dem Molekül die Macht, sein eigenes Gen ein- oder auszuschalten. Ihr Vorkommen bei bakteriellen Krankheitserregern macht sie auch für Medikamentenentwickler interessant.

Von Jeffrey E. Barrick und Ronald R. Breaker

Im Herbst des Jahres 2000 weckte ein rätselhafter Umstand bei Bakterien unser Interesse, der mit ihrer Vitaminherstellung zu tun hatte. Eigentlich beschäftigten wir uns gerade mit der Entwicklung künstlicher Bioschalter und zwar auf der Basis einer Molekülart, die in der Frühzeit des Lebens wohl das Sagen hatte. Doch dies gab unserer Suche nach des Rätsels Lösung die richtige Stoßrichtung. Was unsere Arbeitsgruppe an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut) entdeckte, war weit bedeutsamer als erwartet. Wir stießen auf einen neuartigen Weg der zellulären Selbstregulation, der auf einem der evolutionär ältesten biologischen Moleküle beruhte, nämlich der Ribonukleinsäure, der RNA. In ihrer bekanntesten Funktion, als so genannte Boten-RNA, galt sie lange als bloße Ordonanz der Erbsubstanz DNA. Sie kann aber auch, wie wir nun wissen, selbst erhebliche Autorität über ihre DNA erlangen – dank der von uns entdeckten Sorte RNA-Elemente, die wir Riboschalter (englisch *riboswitches*) tauften.

Als mögliches molekulares Relikt aus einer ganz frühen Phase des Lebens ist schon die bloße Existenz dieser Schalter faszinierend. Noch interessanter ist ihre Funktionsweise, nicht zuletzt für Bioingenieure, wenn auch manches daran noch zu klären bleibt. Schon jetzt ist aber klar, dass Riboschalter auch mögliche Angriffspunkte zur Entwicklung neuer Medikamente bieten. Zahlreiche bakterielle Krankheitserreger beispielsweise regulieren über Riboschalter bestimmte grundlegende Aspekte ihres Stoffwechsels. Wirkstoffe, die den Hebel in die falsche Richtung kippen lassen, könnten neue Antibiotika abgeben – das ist besonders wichtig, weil die alten als Waffen zunehmend stumpf werden.

Diese altertümliche Variante der Selbstregulation würde in heutigen Lebensformen kaum fortbestehen, wäre sie dort nicht von Bedeutung. Bakterienzellen sind erstaunlich anpassungsfähige und weit gehend autonome biochemische Fertigungsanlagen, die sich auf eine einzige Aufgabe spezialisiert haben: so viele Kopien ihrer selbst wie möglich herzustellen. Aber: Nur wenn Stämme fähig sind, die extrem schnelle Generationenfolge im mörderischen Wettbewerb um knappe Ressourcen unter wechselnden Bedingungen aufrechtzuerhalten, haben sie lange Bestand.

Unter optimalen Bedingungen schafft es manches Bakterium, sich in nur zwanzig Mi-

Wie die technischen Maschinen einer Fabrik müssen auch die biologischen Maschinen einer Zelle bedarfsgerecht ein- und ausgeschaltet und geregelt werden. Ein verblüffender Weg, offenbar uralt, medizinisch aber höchst interessant, wird derzeit erforscht.

SLIM FILMS

VON DNA ZU RNA

- **DNA:** Die Desoxyribonukleinsäure (englisch abgekürzt DNA) ist in allen heutigen Zellen der Speicher für die Erbinformation und damit Träger der Gene.
- **Boten-RNA:** Sie ist eine Ribonukleinsäure (englisch abgekürzt RNA) und gibt die in Genen enthaltenen Bauanweisungen für Proteine an die Proteinfabriken der Zelle weiter.

In Kürze

- Die **Regulation der Genexpression** obliegt gewöhnlich speziellen Proteinen. Hauptsächlich Bakterien nutzen dazu aber auch besonders ausgestattete Boten-RNAs, welche die Expression ihres eigenen Gens auf diversen Ebenen selbst überwachen.
- Bei dieser Zusatzausstattung handelt es sich um **neu entdeckte RNA-Elemente** mit zuvor unbekannten Machtbefugnissen. Sie dürfen entscheiden, ob die Bauanweisung auf ihrer Boten-RNA ausgeführt werden soll oder hinfällig ist. Sie wurden **Riboschalter** getauft.
- Zusammen mit RNAs, die sich wie Enzyme verhalten, sprechen die neuen Elemente für die Hypothese einer **Urwelt frühen Lebens,** das auf RNA basierte.

nuten erstmals zu vermehren und dafür ganze Hundertschaften komplizierter Moleküle herzustellen. Die Fähigkeit beruht zunächst auf der genetischen Information, die es in seiner Erbsubstanz DNA archiviert hat und die es wie jedes Lebewesen von Generation zu Generation in möglichst originalgetreuer Kopie weitergibt.

Geschrieben ist diese zelluläre Bau- und Betriebsanleitung mit dem bekannten vierbuchstabigen DNA-Alphabet aus den organischen Basen Adenin, Thymin, Cytosin und Guanin (A, T, C und G), die an einem doppelsträngigen Grundgerüst aus alternierenden Zucker- und Phosphateinheiten aufgereiht sind. Immerhin 90 Prozent der DNA eines typischen Bakteriums trägt verschlüsselte Anweisungen zum Bau seiner Proteinmaschinerie: Eiweißmoleküle katalysieren und regulieren die Stoffwechselreaktionen, die zum Aufbau einer neuen Zelle aus einfachen Grundsubstanzen benötigt werden.

Für den ersten Schritt zur Fertigung eines Proteins muss das Enzym RNA-Polymerase an die DNA andocken und die nötigen Teile des Textes abschreiben: in Form der chemisch ähnlichen Boten-RNA (auch Messenger-RNA genannt). Bakterienzellen haben es dabei enorm eilig, denn kaum hat die erste Polymerase ihre Arbeit aufgenommen, sitzt ihr schon eine Kollegin im Nacken und beginnt mit der nächsten Abschrift. Die meisten Boten-RNAs tragen die Bauanweisung für ein einziges Protein, manche jedoch, an so genannten DNA-Operons transkribiert, gleich für mehrere Sorten, die funktionell zusammengehören.

Da Boten-RNAs chemisch weniger stabil sind als DNA, handhabt die Zelle sie wie Fotokopien: Nicht mehr benötigte Exemplare kommen sofort in den Aktenschredder und werden wie Papier recycelt, sodass nur die aktuellen Arbeitsanweisungen für die Ribosomen – die Fertigungseinheiten für Proteine – bereitstehen.

Wie die RNA-Polymerase haben es auch die bakteriellen Ribosomen eilig. Noch bevor das Enzym seine Abschrift ganz fertig gestellt hat, beginnen sie, die Anweisungen zu lesen und auszuführen. Im typischen Fall reihen sie sich dazu an der RNA-Schiene auf, fahren an ihr entlang und »übersetzen« dabei jeweils aufeinanderfolgende Dreiergruppen von RNA-Basen gemäß dem genetischen Code in die entsprechende Aminosäure. Dieser Vorgang wird Translation genannt. Stück für Stück knüpfen sie so die Aminosäurekette ihres Proteins weiter. Sobald diese dem Ribosom entschlüpft, faltet sie sich zu einem komplexen räumlichen Gebilde zusammen. Damit ist ein weiteres Protein bereit, seine Arbeit in der zellulären Maschinerie des Bakteriums aufzunehmen.

Die Hauptlast der Stoffwechselarbeit tragen zwei Klassen von Proteinen: Transporter, die Rohmaterialien befördern, und Enzyme, die deren Umsetzung in den Stoffkreisläufen der Zelle katalysieren. Bakterien sind ganz darauf getrimmt, keine Ressourcen durch Produktion momentan überflüssiger Betriebsmittel – sprich Arbeitsproteinen – zu verschwenden. Sie verfügen über Kontrollmechanismen, mit denen Aufträge zur Herstellung einzelner Arbeitsproteine gestoppt werden können, wenn sich das Angebot oder der Bedarf an Nährstoffen verändern. Typischerweise nutzen Bakterien eine Reihe von Supervisor-Proteinen, um laufend die verfügbaren Mengen an diversen Rohmaterialien zu überwachen und den Nachschub der nötigen Transporter und Enzyme entsprechend zu regeln.

Unterdrücker und Terminatoren

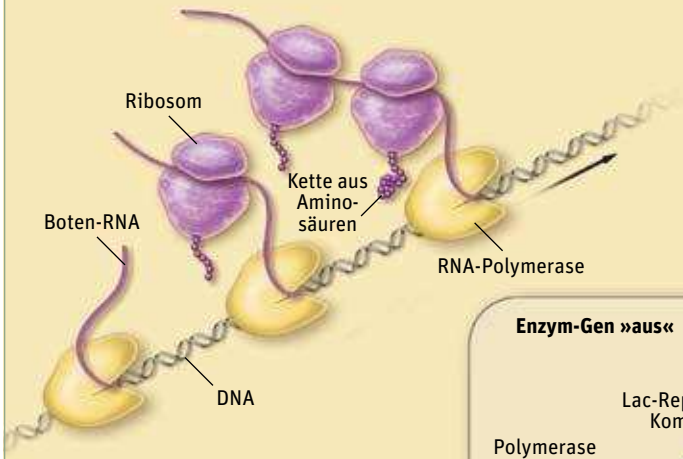
Ein Beispiel für eine solche Instanz ist der so genannte Lac-Repressor des Darmbakteriums *Escherichia coli,* das Lactose (Milchzucker) gezielt aufnehmen und zur Energiegewinnung nutzen kann. In der aktiven Form – als Komplex aus mehreren identischen Einheiten – blockiert dieser »Unterdrücker« den Zugang zu den Genen für den Transporter wie auch für ein Lactose spaltendes Enzym. Das geschieht so lange, bis für die beiden Akteure Bedarf besteht. Steigt nämlich die Lactose-Konzentration über ein bestimmtes Niveau, fällt der Repressor von der DNA ab und ermöglicht so ein Abschreiben der beiden Gene (siehe Kasten rechts, Mitte).

Ein ähnlicher Regulationsmechanismus beruht auf Proteinen, die während der Entstehung von Boten-RNAs an der DNA darüber entscheiden, wie weiter zu verfahren ist. Ein Beispiel dafür bietet ein ringförmiger Komplex aus einem Protein mit dem Namenskürzel TRAP bei dem Bodenbakterium *Bacillus subtilis*. Er kontrolliert zwei DNA-Operons, die für Enzyme zur Herstellung von Tryptophan beziehungsweise für einen Transporter dieser Aminosäure kodieren.

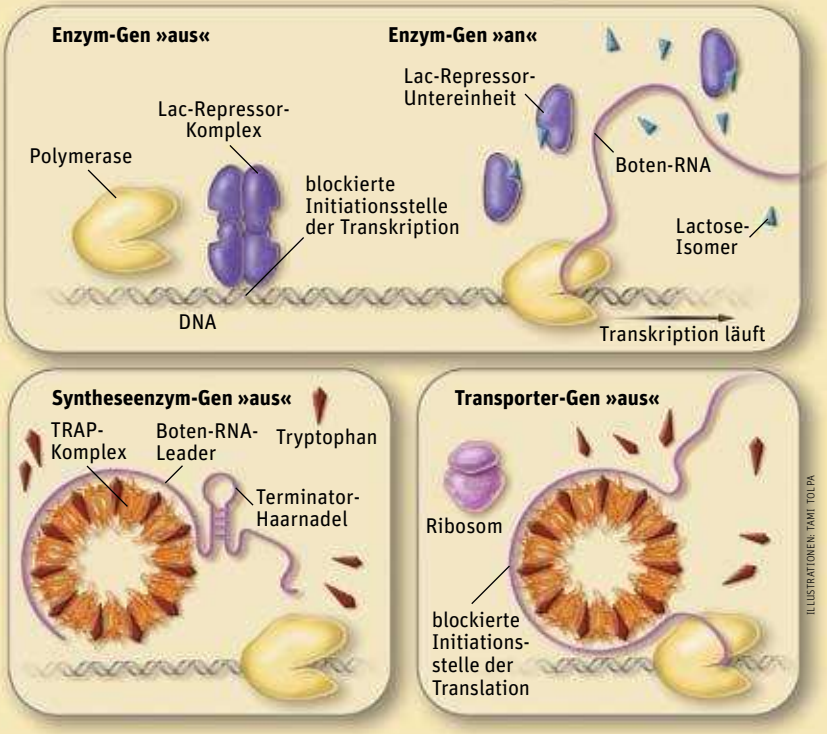
Ist genügend Tryptophan vorhanden, benötigt die Zelle keines dieser Synthese- und Transportmoleküle. TRAP wickelt dann den Vorspann, den als Erstes erscheinenden Teil, der entstehenden Boten-RNAs fest um sich. Im Fall des Transporters hindert dies die Ribosomen daran, eine Stelle auf seiner Boten-RNA zu erkennen, wo sie mit der Übersetzung zu beginnen haben. Im Fall der Enzyme bildet deren Boten-RNA eine haarnadelförmige Struktur aus, die von der RNA-Polymerase als Terminationssignal gewertet wird –

Proteine als Kontrolleure

Bakterien koordinieren und optimieren effizient die Fertigung von Teilen, die sie zum Bau und Betrieb ihrer Zellfabrik brauchen. Als Supervisoren fungieren gewöhnlich Proteine. Diese können die Herstellung beispielsweise von Katalysatoren (als Enzyme tätige Proteine) unterbinden, wenn kein Bedarf besteht. Ein Enzym etwa, das Milchzucker spaltet, wird nur gebraucht, wenn verwertbarer Milchzucker vorliegt.



Das zelluläre Fließband
In Bakterien werden Proteine wie am Fließband nach den Bauanleitungen der DNA produziert. Polymerase-Enzyme bewegen sich an einem der beiden DNA-Stränge entlang und transkribieren ein Gen in seine Boten-RNA. Noch während diese Abschrift entsteht, docken bereits Ribosomen an und übersetzen das Gelesene in eine Kette aus Aminosäuren, die sich zu einem fertigen Protein faltet.



Überwachung der Betriebsmittel
Regulatorproteine steuern die Produktion und nutzen dabei eine Reihe unterschiedlicher Mechanismen, hier am Beispiel des Lac-Repressor-Komplexes (großer Kasten) und des TRAP-Komplexes (darunter) veranschaulicht.

Der Lac-Repressor schaltet als Komplex ein Gen aus, das für ein Lactose spaltendes Enzym kodiert: In Abwesenheit von Lactose (Milchzucker) versperrt er der Polymerase den Zugang zur DNA. Bei hoher Konzentration hingegen bindet sich ein Isomer der Lactose an bestimmte Vertiefungen in den Untereinheiten des Repressors. Dieser zerfällt in seine Teile und das Gen wird eingeschaltet.

Der TRAP-Komplex reguliert die Produktion von Proteinen, die an der Synthese und dem Transport der Aminosäure Tryptophan beteiligt sind. Dies tut er auf zwei verschiedene Arten. In Gegenwart von Tryptophan schlingt TRAP den Anfang der Boten-RNA, die für die Synthese-Enzyme kodiert, um sich. Dadurch bildet ein anderer Abschnitt der RNA eine Haarnadelstruktur aus, die als »Terminator« wirkt. Die Polymerase bricht die weitere Transkription ab (unten links). Im Fall der Boten-RNA für den Transporter verdeckt TRAP dem Ribosom die Stelle, an der es mit dem Übersetzen, der Translation, beginnen sollte (unten rechts).

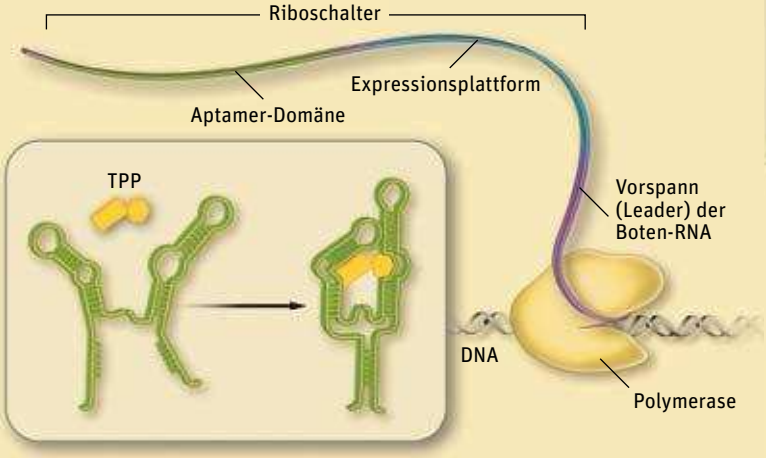
und diese bricht daher das weitere Abschreiben ab (siehe untere Sequenz im Kasten oben).

Bakterien verfügen aber auch über eine reichhaltige Werkzeugkiste zur Biosynthese ungewöhnlicher Verbindungen. Anders als Menschen können sie beispielsweise Vitamine aus einfachen Grundsubstanzen selbst herstellen. Etliche Vitamine sind Vorstufen so genannter Coenzyme: niedermolekularer Verbindungen, die – wie der Name besagt – mit einem enzymatisch tätigen Protein zusammenarbeiten. Es handelt sich um komplexe Spezialkomponenten, die wichtige biochemische Funktionen erfüllen. Ihre Herstellung erfordert komplizierte und energieaufwändige Synthesewege in der Zelle. Von Natur aus auf Effizienz getrimmt, regulieren Bakterien diese daher strikt und schalten sie sofort ab, wenn kein Bedarf besteht.

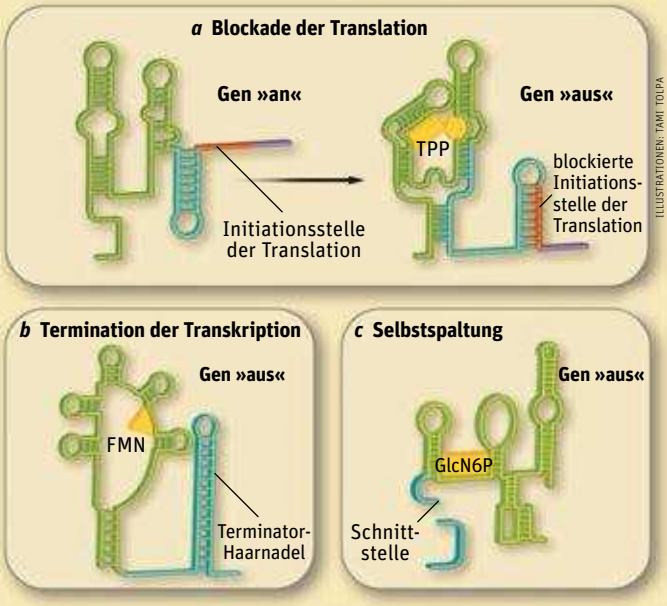
In den späten 1990er Jahren beobachteten Wissenschaftler bei gewissen Coenzym-Synthesewegen ein Regulationsmuster, das sie an die Funktionsweise von TRAP und Lac-Re-

Selbstbestimmte Schalter

Eine neu entdeckte Form der zellinternen Regulation beruht auf Boten-RNAs, die sich dank Spezialausstattung selbst kontrollieren können. Sie enthalten in ihrem Vorspann – vor der eigentlichen Genabschrift für das Protein – so genannte Riboschalter. Ein solcher Schalter kann den aktuellen Bedarf der Zelle an dem kodierten Protein indirekt erfassen und dann durch Änderung seiner eigenen Gestalt entscheiden, ob es hergestellt wird oder nicht. Entsprechend verfügt er über ein Sensor- sowie ein Reaktionsteil: Aptamer beziehungsweise Expressionsplattform genannt. Beide können sich auch etwas überschneiden. Der erste Abschnitt erkennt – bindet – eine relevante Stoffwechselsubstanz (Kästchen unten), an deren Synthese beispielsweise das Protein beteiligt ist. Der zweite Teil bestimmt über das weitere Schicksal der Boten-RNA durch unterschiedliche Arten der Faltung (Kästchen rechts).



Die Sensorfunktion ▲
Ein Aptamer – hier eines für das Coenzym Thiaminpyrophosphat (TPP, Coenzym B_1) – faltet sich in spezieller Weise, kaum dass die Polymerase diesen RNA-Abschnitt hergestellt hat. Stabilisierend wirken dabei die Wasserstoffbrücken in den haarnadelartig gefalteten Bereichen (links). Ist TPP vorhanden, wird das Aptamer es binden und dabei seine eigene Gestalt verändern (rechts).



Effekte der Riboschalter ▲
Ihre Kontrollfunktion über die Proteinproduktion und damit die Genexpression üben Riboschalter auf unterschiedlichen Ebenen aus. Beispiel TTP: Fehlt es, faltet sich die Expressionsplattform so, dass die Ribosomen-Bindungsstelle auf der RNA zugänglich bleibt und die folgende Bauanweisung ausgeführt werden kann (*a,* links). Hat das Aptamer dagegen TPP gebunden, so bildet die Expressionsplattform eine Haarnadelstruktur aus, welche die Ribosomen-Bindungsstelle verdeckt (*a,* rechts). Die Übersetzung der RNA, die Translation, kann dann nicht starten. Ein anderer Schalter – er spricht auf Flavinmononucleotid (FMN, Coenzym B_2) an – bildet eine Terminator-Haarnadel, die das Transkribieren der weiteren Boten-RNA am Gen vorzeitig beendet *(b).* Ein ungewöhnlicher Schalter, der auf Glucosamin-6-phosphat (GlcN6P) reagiert, erwies sich als so genanntes Ribozym: Seine Expressionsplattform spaltet sich selbst *(c).*

pressor erinnerte. Es gelang ihnen hier jedoch nicht, entsprechende Kontrollproteine zu identifizieren, welche die Transkription oder Translation von Genen in Abhängigkeit von den jeweiligen Coenzym-Konzentrationen regeln. Eine mysteriöse Sache: Wenn nicht über solche zu erwartenden Proteine – wie sonst könnte dann die Zelle die verfügbare Menge dieser Stoffe messen? Die Antwort ergab sich letzten Endes unerwartet aus Forschungsarbeiten über Funktionen und Anwendungen von RNA-Molekülen, die beide scheinbar nichts mit der Fragestellung zu tun hatten. Doch um dies zu verstehen, müssen wir noch einmal zum Ribosom zurückkehren.

So wichtig Proteine auch zum Bau und Betrieb einer Zelle sein mögen, stellen sie doch nicht alle wesentlichen Komponenten der Zellmaschinerie. Gerade die Ribosomen enthalten als Kernbestandteil Ribonukleinsäuren, also Moleküle aus dem gleichen Grundmate-rial wie die Boten-RNAs, die sie ablesen. Obwohl eine ribosomale RNA (kurz rRNA) ebenfalls als Abschrift eines DNA-Abschnitts entsteht, trägt sie keine Instruktionen zur Herstellung eines Proteins. Stattdessen nimmt ihr Strang sofort eine verkrumpelt wirkende, aber definierte Gestalt an mit Bereichen, die wie bei der erwähnten Terminator-Haarnadel durch die Paarung komplementärer Basen zusammengehalten werden.

An der großräumigen Faltstruktur ribosomaler RNAs beteiligen sich mehrere Untereinheiten und sie wird an verschiedenen Stellen durch subtile chemische Modifikationen verfestigt. Klammern und Bolzen aus Protein verstärken Spalten in dem Gebilde und überziehen seine Oberfläche. Doch das Herzstück

der Ribosomen, das die Verknüpfung von Aminosäuren katalysiert, besteht ausschließlich aus RNA, wie erst Analysen der Raumstruktur in atomarer Auflösung vor wenigen Jahren offenbarten.

Dieser Nachweis für eine RNA-Struktur mit der katalytischen Potenz eines Enzyms war damals nicht der erste, aber aufregend für alle, die mit der Vorstellung einer einstigen »RNA-Welt« vertraut waren. Es handelte sich um eine Hypothese zur Natur des frühen Lebens, die Harold White III von der Universität von Delaware in Dover in den 1970er Jahren propagiert hat. Ihm war aufgefallen, dass die chemische Struktur vieler wichtiger Coenzyme mehr oder weniger RNA-artige Elemente beinhaltet: ein vollständiges Nukleotid beispielsweise im Adenosylcobalamin (einer Coenzym-Form des Vitamins B_{12}, das auch Cobalamin heißt) sowie ein Stückchen des Zucker-Phosphat-Rückgrats im Thiaminpyrophosphat (TPP, der Coenzym-Form des Vitamins B_1, das auch Thiamin heißt).

Zeugen einer vergangenen Welt

In diesen Elementen, die jedoch nur als Haltegriff für Proteine zu dienen scheinen, vermutete White rudimentäre Überbleibsel aus der Frühzeit des Lebens, als »Protozellen« – so die Idee – weder über DNA als Informationsspeicher noch über eine Proteinsynthese verfügten. Damals habe die RNA eine Doppelfunktion erfüllt: als informationsspeicherndes Molekül und als katalytisches Biopolymer, das sich zu »Stoffwechselmaschinchen« falten und komplexe Funktionen ausüben konnte, die heute gewöhnlich die Domäne der Proteine sind.

In den frühen 1980er Jahren waren dann zwei »lebende« Beispiele für solche urzeitlichen RNA-Elemente belegt. Eines von ihnen, die RNase P, ist ein bakterielles RNA-Molekül, das Primärabschriften anderer RNAs zurechtschneidet, wie Sidney Altman von der Yale-Universität nachwies. Ein weitere bahnbrechende Entdeckung waren RNA-Sequenzen, die sich aus einem längeren Boten-RNA-Transkript selbst herausschneiden können; sie bewerkstelligen das durch seriellen Austausch chemischer Bindungen, wie Thomas R. Cech von der Universität von Colorado in Boulder herausfand. Die beiden Forscher erhielten 1989 gemeinsam den Nobelpreis für Chemie. Ihre Ergebnisse zeigten, dass RNA-Moleküle, die zuvor als bloße passive Träger von Botschaften galten, ähnlich wie Proteine komplexe dreidimensionale Strukturen annehmen und chemische Reaktionen katalysieren können. Solche Enzyme auf RNA-Basis, einschließlich der in Ribosomen, bezeichnet man insgesamt als Ribozyme.

Wie ließ sich nun die neu entdeckte Fähigkeit der RNA zur Bildung biochemisch aktiver Raumstrukturen wissenschaftlich kreativ nutzen? In den frühen 1990er Jahren waren die Verfahren zur Manipulation von Biomolekülen außerhalb lebender Zellen hinreichend ausgereift; mit entsprechenden Experimenten konnte daher einerseits die Vielseitigkeit der RNA und so die Plausibilität der RNA-Welt-Hypothese geprüft und andererseits nach neuartigen biotechnologischen Anwendungen für Ribozyme geforscht werden. Die Beschäftigung mit eben diesen Fragen veranlasste unsere Arbeitsgruppe schließlich, die mysteriösen Regulatoren der bakteriellen Coenzym-Produktion nicht mehr nur unter den Proteinen zu suchen.

Zunächst entwickelten Larry Gold in Boulder, Gerald Joyce vom Scripps- Forschungsinstitut in La Jolla (Kalifonien) und Jack W. Szostak vom Massachusetts General Hospital in Boston mit ihren Teams eine Methode, im Reagenzglas Evolution im Zeitraffer ablaufen zu lassen. Sie konnten dadurch Billionen synthetischer RNA-Sequenzen einer Art Darwin'scher Selektion unterwerfen, bei der nur die »fittesten«, für den jeweiligen Zweck geeignetsten Moleküle überleben. Szostaks Gruppe fand auf diese Weise rasch eine ganze Reihe von kurzen RNA-Sequenzen, die Substanzen wie Adenosintriphosphat (ATP, die universelle Energiewährung der Zelle), organische Farbstoffe, Aminosäuren oder Antibiotika fest an sich binden konnten.

Für diese im Labor geschaffenen RNA-Moleküle prägte Szostak den Begriff Aptamere, abgeleitet von dem lateinischen *aptus* für »fähig, passend«. Trotz ihres unnatürlichen Ursprungs verfügten viele davon über eine Eigenschaft, die in biologischen Systemen fast noch wichtiger ist als die bloß feste Bindung des Zielmoleküls: Sie verhielten sich wählerisch, lehnten strukturell eng verwandte andere Moleküle als Partner ab.

Es werde Licht

Diese hohe Selektivität wollten wir nutzen, um einen Sensor aus RNA zu entwickeln. Unser Aptamer sollte ein Zielmolekül erkennen (sprich: binden) und diesen Vorgang auch anzeigen. Dazu koppelten wir es an ein zweites RNA-Segment, das ein optisches Signal erzeugen konnte. Dafür wählten wir ein so genanntes Hammerkopf-Ribozym: eines der einfachsten und effektivsten selbstspaltenden Ribozyme, die aus der Natur bekannt sind. An einem Ende dieses nach seiner Gestalt benannten Moleküls brachten wir eine fluoreszierende Markierung an und an einer anderen Stelle eine so genannte Quencher-Gruppe, die

WELT OHNE DNA

Nach der RNA-Welt-Hypothese gab es in der frühen biologischen Evolution zunächst Leben ohne das Erbmolekül DNA. Damals soll die RNA Speicher der Erbinformation und Katalysator von Lebensprozessen gewesen sein.

Unser Sensor aus RNA sollte Zielmoleküle binden und auch den Vorgang anzeigen

Attraktive Angriffspunkte

Viele Bakterien, darunter auch die aufgeführten Krankheitserreger beim Menschen, kontrollieren über Riboschalter die Expression einiger ihrer Gene. Wirkstoffe, die für eine Fehlschaltung sorgen, könnten daher als neuartige Antibiotika dienen – insbesondere wenn sie dadurch die Funktion solcher Gene stören, ohne die der Erreger nicht überleben oder seine Wirkung entfalten kann. Die Tabelle gibt jeweils die Anzahl unterschiedlicher Klassen von Riboschaltern an sowie die Zahl bekannter von ihnen regulierter Gene. Ein Sternchen (*) bedeutet, dass darunter mindestens eines lebenswichtig ist.

bakterielle Krankheitserreger des Menschen	Anzahl der Klassen von Riboschaltern	Anzahl der regulierten Gene
Acinetobacter baumannii	4	6
Bacillus anthracis	9	82
Brucella melitensis	5	21*
Enterococcus faecalis	7	17
Escherichia coli	4	15*
Francisella tularensis	4	8
Hemophilius influenzae	5	15*
Helicobacter pylori	1	2
Listeria monocytogenes	9	49
Mycobacterium tuberculosis	3	13
Pseudomonas aeruginosa	3	27
Salmonella enterica	3	34*
Staphylococcus aureus	8	30*
Streptococcus pneumoniae	5	19
Vibrio cholerae	5	13
Yersinia pestis	3	11

QUELLE: KENNETH F. BLOUNT UND RONALD R. BREAKER

durch die räumliche Faltung der RNA in unmittelbare Nähe der Markierung zu liegen kommt und deren Fluoreszenz löscht (englisch *to quench*, löschen). Bindet nun das Aptamer-Ende der Konstruktion das zu erfassende Zielmolekül, so trennt der Hammerkopf durch Selbstspaltung die Auslöschgruppe von der Fluoreszenzmarkierung – und das Ganze leuchtet auf, als hätte man eine Blende weggezogen.

Unser RNA-Konstrukt erwies sich als so fähiger Sensor, dass wir später weitere Aptamer-Ribozym-Gespanne zur Erfassung ganz unterschiedlicher Substanzen entwickelten. Auf einem Mikrochip angeordnet, könnte unsere Sensorkollektion viele chemische Verbindungen gleichzeitig erkennen, selbst wenn diese in komplexer Mischung vorliegen.

Die Natur war schneller

Es war eigentlich erstaunlich einfach gewesen, RNAs herzustellen, die kleine Moleküle detektieren und auf deren Bindung mit einer zweckmäßigen Umgestaltung ihrer eigenen Struktur reagieren. Dies brachte uns auf den Gedanken, ob nicht auch die natürliche Evolution einst ähnliche RNA-Konstrukte hervorgebracht hatte. Zumindest erfüllten »RNA-weltliche« Ribozyme bei heutigen Organismen noch immer essenzielle Funktionen. Verbargen sich in den Genomen moderner Organismen etwa noch weitere Sequenzen, die für andere wichtige »RNA-Maschinen« kodieren?

Wir durchforsteten zunächst die wissenschaftliche Literatur nach Fingerzeigen für mögliche natürliche Aptamere, fanden aber nur interessante Verweise auf nichtkodierende RNAs, von denen man wusste, dass sie irgendwie für die zelluläre Regulation bedeutsam waren. Bei der weiteren Recherche stießen wir dann auf die rätselhafte bakterielle Regulation in Sachen Vitamine beziehungsweise Coenzyme – und dort auf ein Protein namens BtuB, das beim Darmbakterium *E. coli* eine wichtige Rolle beim Import von Coenzym B_{12} in die Zelle spielt. Seine Boten-RNA beginnt mit einem ungewöhnlich langen nichtkodierenden Vorspann aus insgesamt 240 Nukleotiden. Die schiere Länge dieser so genannten Leader-Sequenz schien uns ein erster verdächtiger Hinweis auf eine ungewöhnliche Funktion zu sein.

Eine andere Forschergruppe hatte bereits herausgefunden, dass die Produktion des BtuB-Proteins gehemmt wurde, wenn der B_{12}-Gehalt in der Zelle hoch war. Aber kein Regulatorprotein konnte entdeckt werden, das ihn misst. Wir wussten nur aus wiederum anderen Arbeiten, dass B_{12} auf noch ungeklärte Weise das Andocken von Ribosomen an die BtuB-Boten-RNA verhindert. Ein Experiment deutete zudem darauf hin, dass sich die Gestalt der Leader-Sequenz in Gegenwart von B_{12} irgendwie verändert. Enthielt der lange Vorspann vor der eigentlichen BtuB-Bauanweisung etwa ein natürliches B_{12}-bindendes Aptamer, das deren Expression regulierte?

Um jene Bereiche der BtuB-Boten-RNA zu kartieren, die in Gegenwart von B_{12} eine markantere oder eine flexiblere Form annahmen, verwendeten wir die so genannte In-Line-Sondierung. Tatsächlich bildete sich dicht vor dem kodierenden Abschnitt der RNA eine neue Struktur, die eine verhinderte Ribosomenbindung erklären würde. Anscheinend war es also die RNA selbst, die B_{12} detektiert und dessen Import dann reguliert – und zwar auf analoge Weise wie es der Proteinkomplex TRAP bei dem Bodenbakterium *B. subtilis* mit der Boten-RNA für den Tryptophan-Transporter tut, nämlich indem er die Ribosomen an der Übersetzung der kodierenden Sequenz hindert. Unser RNA-Molekül, das die Genexpression ein- oder ausschalten kann, bezeichneten wir als Riboschalter.

Während dieser Untersuchung fiel uns ein weiterer ungelöster Fall eines Regulationsmechanismus auf. Wie vorausgegangene Arbei-

ten ergeben hatten, enthalten die Boten-RNAs, welche die Bauanweisungen der Synthese-Enzyme und Transporter für Coenzym B_1 tragen, bei ganz verschiedenen Bakteriengruppen alle einen gemeinsamen Sequenzabschnitt. Und interessanterweise beeinträchtigen Mutationen darin das übliche Gegensteuern bei ausreichendem B_1-Gehalt (genauer: TTP-Gehalt). Bei *E. coli* liegt diese Sequenz nahe der Stelle, wo das Ribosom mit der Übersetzung für das erste von zwei Synthese-Enzymen beginnt, deren Gene zu einem Operon zusammengefasst sind. Wir konnten zeigen, dass B_1 dieser Boten-RNA eine strukturelle Veränderung aufzwingt, welche die Ribosomen-Bindungsstelle verbirgt. Gebunden wurde es von einer kürzeren, 91 Nukleotide umfassenden Domäne innerhalb des Leaders. Ähnlich unserem künstlichen Sensor war dieser natürliche Riboschalter ein Gespann aus einem Aptamer-Element und einer funktionellen »Reaktions«-Sequenz, die es ihm ermöglicht, die Produktion von B_1 zuzulassen oder nicht (siehe Kasten S. 56, *a*).

Selbst ist der Mann

Somit hatten wir zumindest zwei Boten-RNAs mit der bemerkenswerten Fähigkeit entdeckt, ohne Beteiligung eines Sensorproteins das zelluläre Milieu zu überwachen und eigenständig zu entscheiden, ob die auf ihnen kodierten Proteine wirklich momentan gebraucht werden. Diese Fotokopien der DNA waren ganz sicher keine passiven Träger von Botschaften. Vielmehr bestimmten sie ihr eigenes Schicksal, indem sie sich wie komplizierte Origami falteten. Die beiden RNAs waren keineswegs bloße biologische Kuriositäten, wie sich alsbald herausstellte. Natürliche Riboschalter, die auf eine Reihe weiterer essenzieller Substanzen des Zellstoffwechsels reagierten, waren in der Fachliteratur schon öfter beschrieben, aber nie als solche erkannt worden. Mitarbeiter unseres und anderer Teams gelang es daher rasch, noch mehr Beispiele zusammenzutragen.

So erwies sich eine gemeinsame RNA-Sequenz in der *B.-subtilis*-Verwandschaft als Riboschalter, der auf das kurz SAM genannte Coenzym S-Adenosylmethionin reagiert (es leitet sich von einer Aminosäure ab). Ferner fand sich ein RNA-Element, das die Synthese und den Transport des Coenzyms Flavinmononucleotid reguliert (dieses entsteht aus ATP und Riboflavin, bekannt auch als Vitamin B_2). Und ein Abschnitt einer Boten-RNA, die vermeintlich für ein Sensorprotein für Lysin kodierte, entpuppte sich als Teil eines komplexen Aptamers, das die Synthese dieser Aminosäure bei zahlreichen Bakterienarten regelt. Riboschalter stellten somit offenbar ein weit verbreitetes Prinzip genetischer Kontrolle dar.

Inzwischen sind ein Dutzend verschiedener Klassen solcher Schalter bekannt, unterteilt nach ihrer Aptamerstruktur. Gewisse Merkmale und Mechanismen variieren zwar, doch haben sich einige allgemeine Prinzipien herauskristallisiert. Natürliche Riboschalter sind demnach Bestandteile von Boten-RNAs, die über die Expression des zugehörigen Gens bestimmen, etwa indem sie die Übersetzung der auf der eigenen RNA enthaltenen Botschaft in Protein zulassen oder aber diese ungelesen der Vernichtung zuführen. Ein Riboschalter erkennt den Bedarf an »seinem« Arbeitsprotein, indem er ein Zielmolekül (eine im Stoffwechsel umgesetzte Substanz, einen Metaboliten) erfasst und mit einer Gestaltänderung darauf reagiert. Ein solcher Schalter enthält daher zwei wichtige Abschnitte: die den Metaboliten erfassende Aptamer-Domäne und die regulatorische Sequenz, die »Expressionsplattform«.

Das Aptamer dient als komplexer Rezeptor für einen bestimmten niedermolekularen Metaboliten. Bei allen Mitgliedern einer Riboschalter-Klasse ist die Grundstruktur dieses Elements gleich, selbst bei evolutionär weit entfernten Organismen. Die Expressionsplattform kann Teile der Aptamer-Domäne mit enthalten und umfasst die Sequenzen, deren Gestaltsänderung die Genexpression beeinflusst. Die Plattformen der zuerst entdeckten B_{12}- und B_1-Riboschalter beispielsweise verhindern das Übersetzen (die Translation), indem sie durch Umfalten eine für die Ribosomen wichtige Signalsequenz verbergen. Andere Schalter nutzen das gleiche Aptamer, besitzen aber Expressionsplattformen, die eine Terminator-Haarnadel ausbilden und so die

Diese »Fotokopien« bestimmten ihr eigenes Schicksal, indem sie sich wie komplizierte Origami falteten

Transkription, das Abschreiben des Gens in Boten-RNA, abbrechen lassen. Auch der B_2-Schalter verhält sich so (siehe Kasten auf S. 56, *b*).

Mit wachsendem Verständnis der Riboschalter wuchs auch unsere Bewunderung, wie fein die Teile des Räderwerks im Laufeder Evolution aufeinander abgestimmt worden waren. So muss sich beispielsweise die Metabolit-Erkennung in den wenigen Sekunden zwischen der Synthese des Boten-RNA-Leaders und dem Andocken der Ribosomen vollziehen. Daher ist nicht unbedingt die Stärke, sondern die Geschwindigkeit der Bindung an den Zielmetaboliten entscheidend, damit das Aptamer ihn zu erkennen vermag. In einigen Fällen sind »Bremssequenzen« eingebaut, an denen die RNA-Polymerase kurz stockt und so dem Aptamer genügend Zeit gibt, ein Metabolit-Molekül einzufangen und die zugehörige Expressionsplattform korrekt umzulagern.

Als wir dann bakterielle Genome nach neuen Beispielen von Riboschaltern durchsuchten, stießen wir auf weitere Überraschungen. Allein bei *Bacillus subtilis* fanden wir acht neue Sequenzen mit Merkmalen von Riboschaltern. Einer davon besaß ein doppeltes Aptamer und schaltete die Genexpression nicht aus, sondern ein! Ein anderer erwies sich sogar als metabolitgesteuertes Ribozym. Statt die Gestalt zu ändern, zerschnitt sich seine Expressionsplattform – eine Selbstzerstörung, bevor die Botschaft übersetzt werden könnte (siehe Kasten S. 56, *c*).

Eine der bislang entdeckten Schalterklassen wurde auch bei mehrzelligen Organismen nachgewiesen. Die Regulation der Genexpression ist bei höheren Organismen komplizierter als bei Bakterien, ebenso der Weg von der DNA-Sequenz zum Protein. Statt einer sofort einsetzbaren Boten-RNA entsteht zunächst eine Rohabschrift, die oft große Einschübe nichtkodierender Sequenzen, so genannte Introns, enthält. Diese müssen herausgeschnitten und die zu übersetzenden Teile erst zu einem durchgängigen Text zusammengefügt werden. Dieser Prozess wird als Spleißen bezeichnet. In den verworfenen Stücken stießen wir auf einen Riboschalter mit dem Coenzym-B_1-Aptamer.

Tatsächlich kommt dieses Element in den Intronsequenzen von Thiamin-Synthese-Operons vieler Pilze und Pflanzen vor, unter anderem auch bei Reis. Binden diese Riboschalter B_1, scheint die RNA sich im Bereich der Introngrenzen umzugestalten und so das weitere Spleißen zu blockieren. Noch sind die Einzelheiten hier unklar. Aber möglicherweise wird die gesamte RNA dann automatisch dem Recycling zugeführt oder nicht in den Bereich der Zelle verfrachtet, in dem die Translation stattfindet.

Interessanterweise heftet sich auch ein bestimmtes Mittel gegen Pilzinfektionen an den B_1-Riboschalter. Es gaukelt wohl damit eine ausreichende Menge an B_1 vor und unterdrückt die weitere Herstellung. Das Wachstum des Pilzes verlangsamt sich, und er kann schließlich, wenn der Mangel an diesem wichtigen Mikronährstoff zu groß wird, zu Grunde gehen. Wie dieses Beispiel vor Augen führt, sind Riboschalter von essenzieller Bedeutung für die Nährstofflogistik verschiedener Kategorien von Organismen, darunter auch von Krankheitserregern. Das macht sie zu einem interessanten Angriffspunkt, an dem neuartige Wirkstoffe zur Bekämpfung ansetzen könnten.

Visionäres für die Medizin

Mehr als ein Dutzend bakterieller Erreger, die den Menschen befallen, nutzt nachweislich Riboschalter zur Regulation wichtiger Metabolite (siehe Kasten S. 58). Intensiv wird daher nach Wirkstoffen gesucht, die von bakteriellen Aptameren als vermeintliches Zielmolekül gewertet werden, was eine für den Erreger schädliche Fehlregulation der Gen expression auslösen sollte.

Einige Forschergruppen verfolgen zudem die Idee, eingeschleuste Gene über künstliche Riboschalter zu steuern – zum Beispiel im Rahmen einer Gentherapie. Das Ziel: ein An-/Aus-Schalter, der sich einem therapeutischen Gen einbauen lässt und auf einen unschädlichen Wirkstoff anspricht. Ein solches Konstrukt könnte dann in Körperzellen des Patienten eingebracht und durch Einnahme des Wirkstoffs gesteuert werden. Die Erforschung von Riboschaltern für diesen Zweck wie auch zur Bekämpfung von Infektionen steht jedoch noch am Anfang.

Wie die Entdeckung der Ribozyme und ihrer potenziellen Anwendungen hat schon jetzt das Wissen um die Existenz der genetischen Schalter auf RNA-Basis eine wissenschaftliche Aufbruchstimmung ausgelöst. Zwar existieren anscheinend nur noch wenige Elemente der RNA-Urwelt, doch das Wenige hat sich mit komplexen Wirkmechanismen und regulatorischen Funktionen bis in die heutigen Organismen hartnäckig gehalten.

Eine Frage bleibt natürlich: Wurden mit den Riboschaltern die letzten aller überlebenden Zeugen der RNA-Welt entdeckt – oder gibt es noch weitere molekulare Fossilien, die bislang unerkannt in den Zellen heutiger Organismen genutzt werden, vielleicht sogar unseren eigenen? ◁

Jeffrey E. Barrick (oben) erforschte die Vielfalt und Bedeutung von RNA-Schaltern gemeinsam mit **Ronald R. Breaker** an dessen Labor an der Yale-Universität in New Haven (Connecticut). Inzwischen beschäftigt er sich als Postdoc an der Michigan State University mit der Evolution von Bakterien sowie mit selbstreplizierenden Computerprogrammen. Breakers Gruppe untersucht weiter die Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten von Nukleinsäuren. Unter anderem konzipiert sie künstliche RNA-Elemente zur Genkontrolle und entwickelt Antibiotika, die an natürlichen Riboschaltern von Krankheitserregern angreifen.

Riboswitches as antibacterial drug targets. Von Kenneth F. Blount und Ronald R. Breaker in: Nature Biotechnology, Bd. 24, Heft 12, S. 1558, 2006

Metabolite-Binding RNA domains are present in the genes of eukaryotes. Von Narasimhan Sudarsan, Jeffrey E. Barrick und Ronald R. Breaker in: RNA, Bd. 9, Heft 6, S. 644, 2003

Thiamine derivatives bind messenger RNAs directly to regulate bacterial gene expression. Von Wade Winkler, Ali Nahvi und Ronald R. Breaker in: Nature, Bd. 419, S. 952, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912785.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

Gletscherschwund am KILIMANDSCHARO

Ernest Hemingway machte ihn einst berühmt: den Schnee auf dem Kilimandscharo. Inzwischen wird die schrumpfende Eiskappe des Tropenvulkans gern als Kronzeuge für den Klimawandel bemüht. Zu Unrecht, wie eine sorgfältige Analyse offenbart.

Von Georg Kaser und Philip W. Mote

In Kürze

- Wie die **meisten Gletscher** weltweit schrumpfen auch die Eisfelder auf dem Kilimandscharo in Tansania. Der prominente Berg wird deshalb gern als Beweis für den Klimawandel herangezogen – so auch in dem Film »Eine unbequeme Wahrheit«.
- **Am Gipfel** des Tropenvulkans herrschen jedoch ganz andere Bedingungen als in den Gletscherzonen der mittleren und hohen Breiten. So gibt es keine thermischen Jahreszeiten, und die Temperaturen liegen fast stets deutlich unter dem Gefrierpunkt.
- Eine **Erwärmung** der unteren Luftschichten durch den menschengemachten Treibhauseffekt, die andere Gletscher schmelzen lässt, kann das Schrumpfen der Eiskappe des Kilimandscharo deshalb nicht erklären. Es beruht auf einem komplexen Zusammenspiel anderer Faktoren.

Schrumpfende Gletscher gelten als sichtbare Zeichen der globalen Erwärmung. Durch den Klimawandel ändert sich zwar auch die Vegetation, doch macht sich das im Landschaftsbild nur schleichend bemerkbar. Dagegen erscheint eine große Eiszunge, die auf einen Bruchteil ihrer früheren Ausdehnung geschrumpft ist, als sinnfälliger und unbezweifelbarer Beweis für steigende Temperaturen. Der Film »Eine unbequeme Wahrheit« präsentiert denn auch aufrüttelnde Vorher-Nachher-Fotos von schwindenden Gletschern rund um den Erdball.

Zweifellos stimmt, dass eine Verbindung zwischen Gletscherschwund und Klimawandel besteht. Doch sind die physikalischen Hintergründe komplizierter als allgemein angenommen. Nicht immer trägt die Erderwärmung die Hauptschuld an der Schmelze.

Ein eklatantes Beispiel bietet das Kilimandscharo-Massiv in Afrika, das nur drei Breitengrade südlich des Äquators liegt. Das Schrumpfen seiner Eiskappe hat so gut wie nichts mit steigenden Temperaturen zu tun. In geringerem Maße gilt das auch für andere Tropengletscher.

Die schwindende weiße Haube des »leuchtenden Berges«, der in dem Film von Al Gore eine so prominente Rolle spielt, eignet sich also keineswegs als Aushängeschild für die Folgen der globalen Erwärmung. Der wahre Grund ist weniger plakativ, aber nicht minder interessant. Das ergaben ausgiebige Feldstudien an tropischen Gletschern in den letzten zwanzig Jahren. Demnach hat der Kilimandscharo, dessen Vulkankegel Kibo weit in die kalte mittlere Troposphäre hineinragt, durch Prozesse, die nur indirekt, sofern überhaupt, mit jüngsten Veränderungen des weltweiten Klimas zu tun haben, Eis verloren.

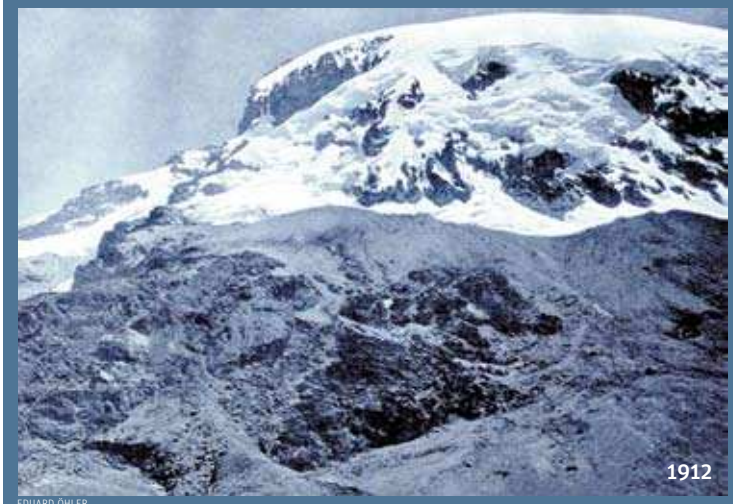
Auch wenn das Schrumpfen seiner Gletscherhaube nicht direkt mit der Erderwärmung zusammenhängt, bedeutet das freilich nicht, dass es diese nicht gibt. Die überwältigenden Belege dafür hat der UN-Klimarat (IPCC) in seinem jüngsten Bericht dargelegt.

Eis in den Tropen

Dass in den Tropen überhaupt Gletscher existieren, ist erklärungsbedürftig. Es liegt daran, dass die Lufttemperatur pro tausend Höhenmeter um etwa 6,5 Grad Celsius abnimmt. Am Gipfel eines 5000 Meter hohen Berges ist es also durchschnittlich 32,5 Grad kälter als auf Meereshöhe. So herrschen sogar in Äquatornähe in diesen Regionen im allgemeinen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, die im Jahresverlauf kaum schwanken. Während der Niederschlagszeiten sammelt sich auf den höchsten Bergen deshalb Schnee an und verwandelt sich in Firn und Gletschereis. Das geschieht in Ostafrika am Kilimandscharo, am Mount Kenia und im Rwenzori-Gebirge, in Indonesien auf dem Irian Jaya und insbesondere in den Anden Südamerikas, wo sich 99,7 Prozent des tropischen Gletschereises befinden.

Für das Wachsen oder Schwinden eines Gletschers ist seine Massenbilanz entscheidend. Diese entsteht durch eine Art Tauziehen zwischen Akkumulation und Ablation,

BEIDE: SCHWARZ-WEISS-FOTOS: USGS GLACIER AND SNOW PROGRAM



EDUARD ÖHLER

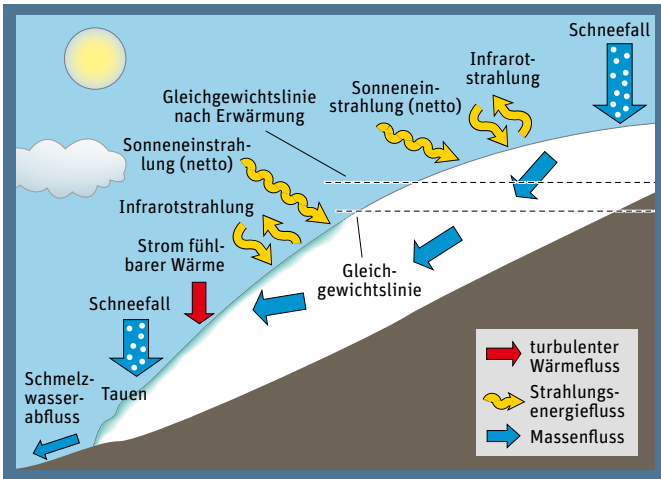
GEORG KASER

Weltweit sind Gletscher in den letzten Jahrzehnten geschrumpft. So hat der South Cascade Glacier (oben) im US-Bundesstaat Washington zwischen 1928 und 2000, als die beiden Fotos entstanden, die Hälfte seiner Masse verloren. Bei ihm und anderen Gletschern in den gemäßigten Breiten spricht vieles dafür, dass der Rückgang von der globalen Erwärmung verursacht wird. Auch die Eiskappe des Kilimandscharo im tropischen Ostafrika (unten) ist seit dem Anfang des 20. Jahrhunderts erheblich kleiner geworden. Hier trägt der vom Menschen verursachte Treibhauseffekt aber keine Schuld. Hauptverantwortlich für das Schrumpfen ist die Sonnenstrahlung, nicht warme Luft. Da in der trockenen Kälte am Gipfel das Eis hauptsächlich sublimiert, aber kaum schmilzt, fließt auch, im Gegensatz zum South-Cascade-Gletscher, kaum Schmelzwasser ab. Das Foto von 2006 zeigt den Berg nach einem Neuschneefall, lässt die Gletscherreste aber dennoch gut erkennen.

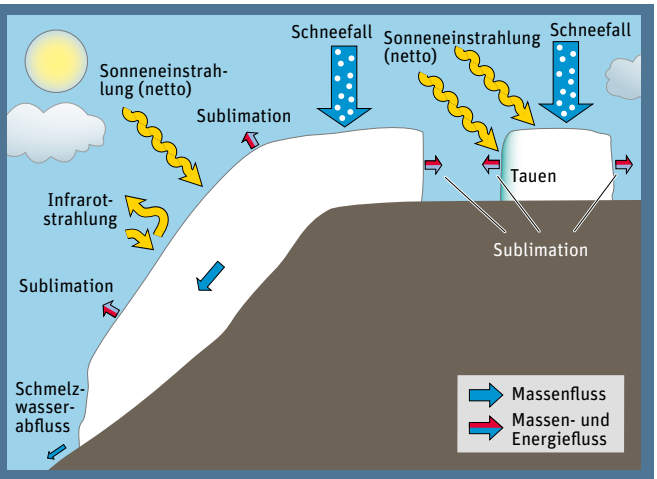
also Eintrag und Verlust von Wasser in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand. Wegen der Variabilität dieser Vorgänge und auf Grund seiner eigenen dynamischen Trägheit kommt ein Gletscher niemals völlig ins Gleichgewicht; vielmehr schlägt das Pendel stets in die eine oder andere Richtung aus.

Auffälligstes und am besten dokumentiertes Zeichen einer geänderten Massenbilanz ist gewöhnlich eine Zu- oder Abnahme der Zungenlänge, die mit einiger Verzögerung auftritt. So hat sich der Muir-Gletscher in Alaska innerhalb der letzten fünf Jahrzehnte um gut zwei Kilometer verkürzt, der Jakobshavn Isbrae auf Grönland sogar um über zehn Kilometer seit 2001 (siehe S. 14). Nach einer klimatischen Störung kann es Jahrzehnte dauern, bis sich die Massenbilanz eines Gletschers wieder einem Gleichgewicht nähert.

Nachschub an Masse liefern Niederschläge in Form von Schnee sowie manchmal, unter sehr feuchten und windigen Bedingungen, auch Raureif. Zum Verlust von Masse führt vor allem der Abfluss von Schmelzwasser. Unter trockenen Bedingungen kommt die Sublimation hinzu, also die direkte Umwandlung von Eis in Wasserdampf, die noch bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt stattfinden kann, aber etwa achtmal so viel Energie wie das Tauen erfordert.



Die Hauptposten in der Massenbilanz eines typischen Gletschers der mittleren Breiten (hier im Sommer) sind Schneezufuhr und Schmelzwasserabfluss. Substanzgewinn und -verlust halten sich an der so genannten Gleichgewichtslinie die Waage; darüber dominiert die Akkumulation, darunter die Ablation. Unterhalb dieser Linie führt der Energiefluss aus der warmen Luft zu einem Wärmeüberschuss. Dieser nimmt bei steigender Lufttemperatur zu. Dadurch verschiebt sich die Gleichgewichtslinie nach oben, was zu verstärktem Abtauen und damit zum Schrumpfen des Gletschers führt.



AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE

Am Kilimandscharo gibt es Eistafeln mit vorwiegend vertikalen Rändern auf dem 5700 Meter hohen, flachen Gipfel sowie mehrere Hanggletscher. In dieser trockenkalten tropischen Klimazone, in der die Temperatur stärker zwischen Tag und Nacht als mit den Jahreszeiten schwankt, bestimmen andere Faktoren die Massenbilanz von Gletschern als in mittleren Breiten. In der großen Höhe herrscht selbst am Äquator praktisch immer Frost und die Hauptenergiequelle ist das Sonnenlicht. Die Abgabe von Infrarotstrahlung übersteigt deren Aufnahme deutlich. Den größten Masseverlust verursacht die Sublimation. Der Schmelzwasserabfluss ist dagegen minimal.

Schwankungen in der Ausdehnung von Tropengletschern hängen primär mit der Luftfeuchtigkeit zusammen

Schmelzen, Sublimation und Erwärmung des Eises erfordern Energie. Diese stammt aus einer Reihe von Quellen, die auf komplexe Weise interagieren. Die wichtigste ist die Sonne, deren direkter Einfluss jedoch auf den Tag beschränkt bleibt und durch Schattenwurf sowie die Lichtreflexion durch den Schnee begrenzt ist. Außerdem tauscht der Gletscher so genannte fühlbare Wärme sowie Infrarotstrahlung mit der Atmosphäre und der umgebenden Landoberfläche aus. Dabei kann er auch Energie verlieren – etwa in Form der »latenten« Wärme, die zum Tauen oder Sublimieren des Eises benötigt wird.

Prekäres Gleichgewicht

Normale Gebirgsgletscher akkumulieren Schnee in großen Höhen, fließen bergab und schmelzen während der warmen Jahreszeit in tieferen Lagen. Im oberen Bereich übertrifft die Akkumulation die Ablation, weiter unter gilt das Umgekehrte. Die Grenze zwischen dem Nähr- und dem Zehrgebiet legt die Höhe der Gleichgewichtslinie eines Gletschers fest, an der die Massenbilanz ausgeglichen ist.

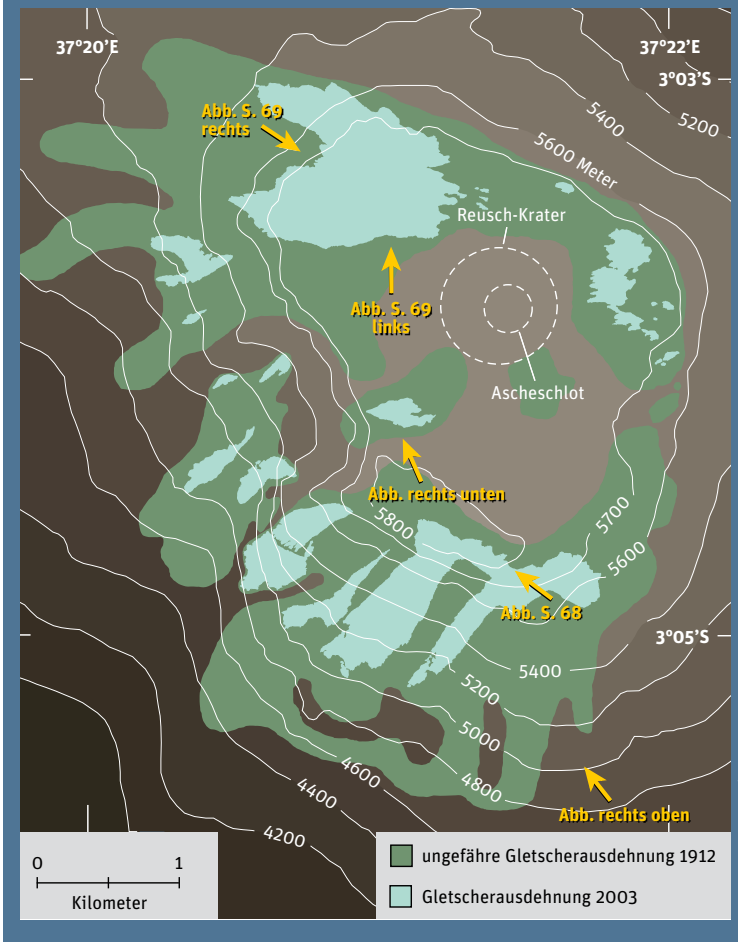
Bei steigenden Lufttemperaturen nimmt der Wärmeübergang von der Luft auf das Eis zu – desgleichen die Infrarotstrahlung aus der Atmosphäre. Infolgedessen beschleunigt sich das Schmelzen, und die Gleichgewichtslinie verschiebt sich nach oben. Dadurch vergrößert sich der Bereich, in dem das Eis taut.

Für tropische Gletscher gelten etwas andere Bedingungen. Dort sind die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht größer als zwischen dem kältesten und dem wärmsten Monat. Die bedeutsamste jahreszeitliche Veränderung in den Tropen besteht im Auftreten von ein oder zwei Regenzeiten. Dann erhalten die hohen Bereiche der Gletscher Nahrung.

Auf tropischen Eisflächen variieren die Bedingungen, die zum Abtauen führen, somit nicht saisonal, sondern treten fast täglich auf. Das hat zur Folge, dass die Gleichgewichtslinie kaum im Jahresverlauf schwankt und ein viel kleinerer Teil des Eises unterhalb dieser Linie liegt als in mittleren Breiten. Zugleich reagieren die Eiszungen tendenziell rascher auf Veränderungen im Massenhaushalt.

Wichtig für das Verhalten tropischer Gletscher ist, ob sie einem vorwiegend feuchten oder trockenen Klima ausgesetzt sind. In humiden Klimazonen und während der Feuchtzeiten beeinflusst eine Temperaturänderung die Massenbilanz merklich. Unter vorwiegend trockenen Bedingungen halten sich Gletscher dagegen nur in sehr großer Höhe, wo es entsprechend kalt ist. Wenn ihre Ausdehnung schwankt, dann hauptsächlich wegen einer Änderung der Luftfeuchtigkeit. Auf diese wirkt sich der steigende Gehalt der Atmosphäre an Treibhausgasen allerdings nur indirekt aus.

Längerfristige Änderungen bei der saisonalen Verteilung der Luftfeuchtigkeit hängen in



KARTE: AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE, NACH: NICOLAS CULLEN ET AL., GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 2006, BD. 33

Das Eis des Kilimandscharo ist auf seinen höchsten Vulkankegel, den Kibo, beschränkt. Bei einer Vermessung im Jahr 1912 bedeckte es eine Fläche von insgesamt 12,1 Quadratkilometern; 2003 waren davon nur noch 2,5 Quadratkilometer übrig. Der rasanteste Schwund fand wohl zwischen 1912 und 1953 statt, als die Eisfläche noch 6,7 Quadratkilometer maß. Pfeile bezeichnen die Blickwinkel der verschiedenen Fotos in diesem Artikel.

BEIDE FOTOS: GEORG KASER

erster Linie von der Oberflächentemperatur der tropischen Ozeane ab – und vom globalen Klima nur insoweit, als es diese Temperatur beeinflusst. Bei vielen tropischen Gletschern ist daher weniger die globale Erwärmung selbst als deren indirekter und ferngesteuerter Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit für den beobachteten Substanzverlust verantwortlich. Allerdings lässt sich ohne genaue Beobachtungen und Messungen nur schwer zwischen den zwei Ursachen unterscheiden.

Unbewegliches Plateaueis

Wie verhält es sich nun mit dem Kilimandscharo? Seine Eisbedeckung nimmt auch unter den Tropengletschern noch einmal eine Sonderstellung ein. Sie besteht aus den bis zu vierzig Meter dicken Resten einer Eistafel auf dem relativ flachen Gipfelplateau des Vulkankegels Kibo in 5700 bis 5800 Meter Höhe sowie aus einer Reihe von Hanggletschern. Diese erstrecken sich vom Plateaurand bis etwa 5200 Meter Höhe hinab, einer in einer schattigen Rinne sogar bis 4800 Meter.

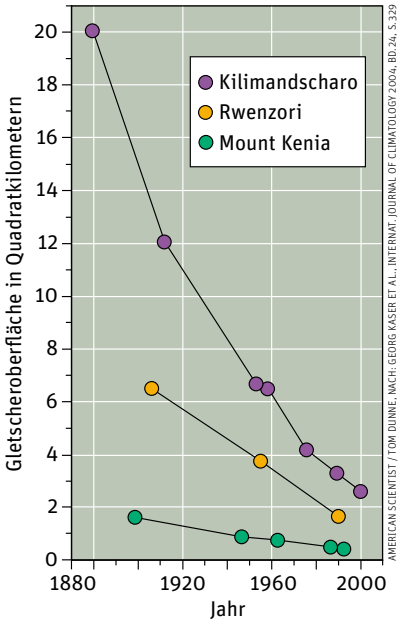
Das Plateaueis liegt unbeweglich an Ort und Stelle; denn es ist zu dünn, um wie ein Kuchenteig unter dem Eigengewicht auseinanderzulaufen. Daher und wegen des fast ebenen Untergrunds ist seine Oberfläche annähernd horizontal. Die Ränder bilden fast senkrechte Wände.

Auch die Hanggletscher bewegen sich trotz der durchschnittlich 35 Grad steilen Flanken des Vulkankegels wenig im Vergleich zu ihren Gegenstücken in gemäßigten Breiten. Das deutet auf kalte Eistemperaturen hin.

Was verursacht nun den Schwund des Kilimandscharo-Eises? Bei anderen Gletschern weltweit lässt sich der Rückgang hauptsächlich auf steigende Lufttemperaturen und das dadurch verstärkte Tauen zurückführen. Das zeigen Korrelationen zwischen der Längenänderung von Eiszungen und Temperaturkurven sowie vereinzelte detaillierte Untersuchungen der Massenbilanz. In einem Fachartikel aus dem Jahr 2000 brachten Lonnie G. Thompson von der Ohio State University in Columbus und Kollegen auch das Schwinden der Eiskappe des Kilimandscharo mit dem globalen Temperaturanstieg in Verbindung. Allerdings konnte das nicht bestätigt werden.

Als alternative Ursachen des Gletscherrückzugs kommen eine geringere Akkumulation von Schnee, starke Sublimation und intensive

ILLUSTRATION: DAVE SCHNEIDER UND STEPHANIE FREESE



AMERICAN SCIENTIST / TOM DUNNE; NACH: GEORG KASER ET AL., INTERNAT. JOURNAL OF CLIMATOLOGY 2004, BD. 24, S. 329

Alle größeren Gletscher im tropischen Ostafrika schrumpfen – allerdings nicht parallel zur globalen Erwärmung wie viele andere Gletscher, die jetzt rasch zurückgehen, während sie sich um die 1970er Jahre im Gleichgewicht oder sogar auf dem Vorstoß befanden. Der Eisschwund am Kilimandscharo dürfte in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts am größten gewesen sein.

Sonnenstrahlung in Frage – alle drei verursacht durch niedrige Luftfeuchtigkeit. Das vermuteten Forscher vielfach schon im 19. und frühen 20. Jahrhundert. Gestützt wird diese Annahme nun durch Geländeuntersuchungen und Modellsimulationen, die einer von uns (Kaser) mit seiner Arbeitsgruppe an der Universität Innsbruck, Douglas R. Hardy vom Climate System Research Center der Universität von Massachusetts in Amherst sowie Tharsis Hyera und Juliana Adosi vom Tansanischen Wetterdienst durchgeführt haben.

Rückgang der Eisfläche um fast neunzig Prozent

Hardy lud Kaser 2001 dazu ein, an einem Dokumentarfilm zweier Fernsehjournalisten über den Eisrückgang am Kilimandscharo mitzuwirken. Seit 18 Monaten sammelten seine Instrumente auf dem Gipfelplateau des Kibo damals schon Wetterdaten. Kaser hatte fast eineinhalb Jahrzehnte lang tropische Gletscher erforscht. Die Gruppe kampierte direkt unter einem der eindrucksvollen Eiskliffs am Südrand des Nördlichen Eisfelds. Fünf volle Tage und Nächte lang beobachteten die Forscher das Plateaueis und diskutierten, angeregt von den hartnäckigen Fragen der beiden Journalisten, die Gründe für seinen Rückgang. Mit dem Skistock zeichneten sie Diagramme in die Vulkanasche, während das Bild vom Gletscherregime auf dem Kibo immer klarere Formen annahm. Darin spielen die lokale Lufttemperatur und ihre Änderung nur eine untergeordnete Rolle.

Beobachtungen am Kilimandscharo zwischen etwa 1880 und 2003 liefern Daten zum Flächenverlust des Eises am Kibo. Der Afrikaforscher Hans Meyer und der Bergsteiger Ludwig Purtscheller erreichten 1889 als Erste den Gipfel. Auf der Basis ihrer Beobachtungen und Skizzen, hauptsächlich aber anhand von Moränen, die in Luftbildern erkennbar sind, rekonstruierte Henry Osmaston 1989 für die Zeit um 1880 eine Eisfläche von 20 Quadratkilometern. Drei Jahrzehnte später war sie schon deutlich auf 12,1 Quadratkilometer zurückgegangen. Das zeigt eine genaue Karte im Maßstab 1:50000, die sich auf eine von Eduard Öhler und Fritz Klute 1912 durchgeführte fotogrammetrische Geländeaufnahme stützt. 2003 waren schließlich nur noch 2,5 Quadratkilometer übrig – ein Schwund von fast 90 Prozent in 123 Jahren.

Ein großer Teil dieser Schrumpfung fand jedoch schon vor 1953 statt, als sich die Hanggletscher stark verkleinert hatten und die Gesamtgletscherfläche nur noch 6,7 Quadratkilometer betrug; das sind 66 Prozent weniger als 1880. Während der gesamten Zeit war die Flächenabnahme der Plateaugletscher konstant – bis heute.

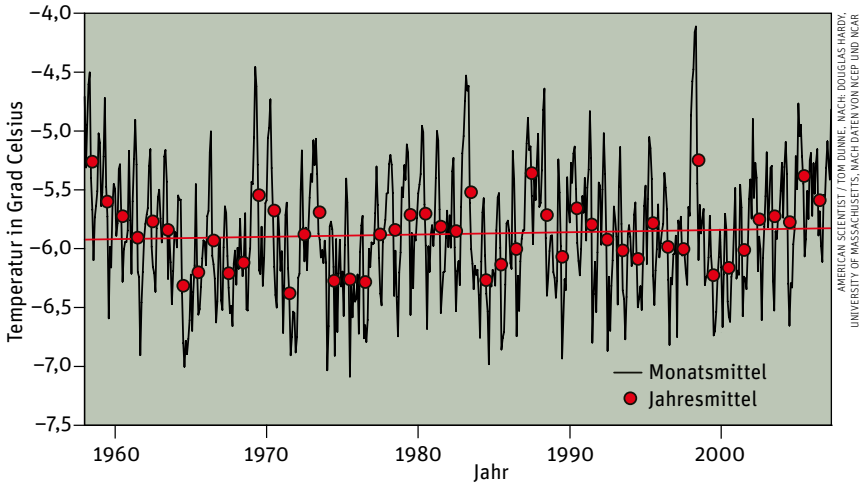
Dieser Verlauf des Rückzugs stimmt nicht mit dem Gang der globalen Mitteltemperatur überein, die nach einer Phase der Stagnation seit den 1970er Jahren steil anstieg. Weltweit verhielten sich die meisten Gletscher dazu konform. Viele hatten nach einer Schrumpfung Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts in den 1970er Jahren ein Gleichgewicht erreicht oder waren sogar vorgerückt, bevor ein rasanter Rückgang einsetzte.

Der Temperaturverlauf am Gipfel des Kilimandscharo ist zwar wegen der geringen Zahl verwertbarer Messungen schwierig zu beurteilen, doch ergibt sich aus den Daten, die der jüngste Bericht des UN-Klimarats enthält, nur eine geringe lokale Erwärmung. Zwar ist demnach im ostafrikanischen Hochland, das wesentlich tiefer als der Kibo liegt, die mittlere Lufttemperatur zwischen 1901 und 2005 um 0,5 bis 0,8 Grad Celsius gestiegen. Die nicht direkt von der Erdoberfläche beeinflusste »freie Troposphäre«, in die der Berg hineinragt, hat sich im Bereich zwischen dem 20. Breitengrad Nord und Süd von 1979 bis 2004 aber um nicht einmal 0,1 Grad pro Jahrzehnt erwärmt. Das ist statistisch nicht von null unterscheidbar.

Eine schon etwas ältere Auswertung von Temperaturmessungen durch Wetterballons im Luftdruckbereich von 500 Millibar – also in rund 5500 Meter Höhe – ergab für die Tropen von 1950 bis 1979 eine Erwärmungsphase, gefolgt von einer Abkühlung zwischen 1979 und 1997. Aus den letzten zehn Jahren fehlen leider Informationen.

Die verfügbaren Durchschnittstemperaturwerte für die Tropen beruhen teilweise auf einer so genannten Reanalyse. Dabei werden alle vorliegenden Messdaten in ein weltumspannendes dynamisches Computermodell eingegeben. Dieses berechnet daraus Temperaturen, Windverhältnisse und andere atmosphärische Größen auch für Gebiete, wo keine direkten Messungen vorliegen. Am Reanalyse-Punkt, der dem Gipfel des Kilimandscharo am nächsten liegt, scheint es seit Ende der 1950er Jahre keinerlei Veränderungen gegeben zu haben.

Zwar ist jede dieser Abschätzungen mit Unsicherheiten behaftet und möglicherweise zu grob, um den Trend am Kilimandscharo richtig zu erfassen. Zusammengenommen deuten die verschiedenartigen Rekonstruktionen aber schon darauf hin, dass die Erwärmung am Gipfel des Kilimandscharo, sofern sie überhaupt stattfand, nicht ausreichte, um den Schwund eines Großteils seiner Eiskappe zu erklären – weder über das gesamte 20.



Für die Gipfelregion des Kilimandscharo liegen kaum Temperaturdaten vor. Inzwischen gibt es jedoch eine Serie von Wetterballonmessungen in Gipfelhöhe. Sie wurden durch eine so genannte »Reanalyse« erweitert, wobei ein globales dynamisches Atmosphärenmodell auch für Gebiete ohne Beobachtungsdaten stimmige Werte liefert. Demnach schwankten die mittleren Monatstemperaturen auf dem Gipfel des Kilimandscharo seit 1958 zwischen –4 und –7 Grad Celsius; eine Gerade durch die Punkte lässt keinen statistisch bedeutsamen Erwärmungstrend erkennen.

Jahrhundert hinweg noch innerhalb der letzten 25 Jahre, dem am besten durch Messwerte dokumentierten Zeitraum.

Von Bedeutung ist außerdem die Beobachtung, dass die am Gipfelplateau des Kilimandscharo seit mehr als sieben Jahren gemessenen Lufttemperaturen selten –3 Grad übersteigen und somit fast immer deutlich im Frostbereich liegen. Deshalb kann die Luft das Eis nicht bis zum Schmelzpunkt erwärmen, weder durch Wärmeabgabe noch durch Infrarotstrahlung. Wenn es gelegentlich taut, ist Sonnenschein bei sehr schwachem Wind dafür verantwortlich. Dann bildet sich, auch in kalter Umgebung, direkt über dem Eis eine warme Luftschicht.

Imposante senkrechte Eiswände

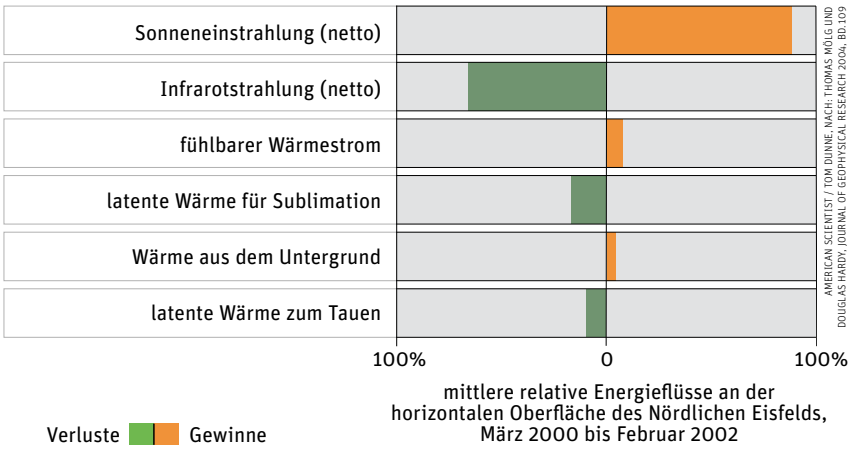
Eine weitere wichtige Besonderheit des Kilimandscharo betrifft die Form und Entwicklung der Eisdecke. Beeindruckende senkrechte Wände türmen sich am Kibo-Gipfel teils mehr als vierzig Meter hoch auf. Weil sich an diesen Abbrüchen keine Schneedecke ansammeln kann, haben die Eistafeln auch bei starkem Niederschlag keine Möglichkeit, sich horizontal auszudehnen. Stattdessen weichen die Wände durch Sublimation ständig zurück – phasenweise, bei Sonnenschein und Windstille, auch durch Tauen. Haben sich die fast vertikalen Kanten einmal gebildet, können sie sich also nur noch zurückziehen, bis das Eis verschwunden ist.

Bei genauer Beobachtung fällt auf, dass diese Wände überwiegend in Ost-West-Richtung orientiert sind. Das spricht für einen Zusammenhang mit der Sonneneinstrahlung, deren Einfallsrichtung und Intensität sich im Jahresverlauf ändert. Um die Zeit der Tag-und-Nacht-Gleichen, wenn die Sonne senkrecht über dem Äquator steht, ist der Himmel meist den ganzen Tag bedeckt. In unserem Sommer und Winter herrscht in Ostafrika dagegen in der Regel Trockenzeit mit wenig Bewölkung. Dann aber steht die Sonne ein gutes Stück nördlich oder südlich des Äquators und damit des Kilimandscharo, sodass sie die nach Süden und Norden schauenden Eiswände bescheint. Dieser Zusammenhang dürfte auch bei der Entstehung der Eiswände Regie geführt haben.

Die Rolle des Sonnenlichts bei ihrem Rückzug zeigt sich in einer weiteren Eigenheit. Wenn eine Eistafel horizontal zurückweicht, hinterlässt sie manchmal wie ein Sägeblatt aufragende Kämme, die schließlich so schmal werden, dass sie umkippen und zerfallen. Immer wieder treten auch so genannte Penitentes (»Büßer«) auf. Diese spitzen Säulen entstehen, wenn sich auf der zunächst ebenen Schneefläche in kleinen Vertiefungen dunkler Staub ansammelt. Weil dieser die Sonnenstrahlung besonders stark absorbiert, beschleunigt sich an den betreffenden Stellen der Tauvorgang. In den Vertiefungen zwischen den Penitentes kann sich die Wärme zudem besser halten, weil sie vor dem Wind geschützt sind, der die oberen Enden der sich entwickelnden Spitzen kühlt.

Wo Infrarotstrahlung und fühlbare Wärme aus wärmerer Umgebungsluft dominieren, glätten sie die Oberfläche des Eises, weil sie gleichmäßig von allen Seiten einwirken. Wä-

Mit Instrumenten wurden die Energieflüsse zu und von der Oberfläche des Kibo-Gipfelgletschers aufgezeichnet. Den größten Beitrag leisten Strahlungsflüsse. Die Infrarotstrahlung hat eine deutlich negative Bilanz, weil sie durch die Temperatur bestimmt wird und die Atmosphäre viel kälter ist als die Gletscheroberfläche. Den drittgrößten Fluss bildet die latente Wärme, die bei der Sublimation abgeführt wird. Die Schmelzwärme ist weniger als halb so groß. Außerdem sickert das Schmelzwasser in tiefere Eisschichten und gefriert dort wieder. Andere Energieflüsse haben kaum Bedeutung.



FOTOS DIESER REIHE: GEORG KASER

Fingerförmige »Penitentes« (»Büßer«) sind ein auffälliges Merkmal der Schnee- und Eisdecke des Kibo. Sie sprechen dagegen, dass die globale Erwärmung den Gletscherschwund am Kilimandscharo verursacht. Sonnenstrahlung und Sublimation neigen dazu, solche Formen zu schaffen; Infrarotstrahlung und fühlbare Wärme aus der Atmosphäre würden sie hingegen glätten. Der Wissenschaftler auf dem Eis ist Nicolas Cullen von der Universität Otago (Neuseeland).

ren sie am Kibo die bestimmenden Faktoren, blieben die Eiswände und Penitentes nicht lange erhalten oder entstünden erst gar nicht.

Wie steht es mit der Massenbilanz an den horizontalen Oberflächen und damit der Dicke der Plateaugletscher auf dem Kilimandscharo? Offenbar wird sie primär vom Schneefall bestimmt. Das ergaben genaue Untersuchungen der Massen- und Energieströme. Hardy hat die jährliche Ablagerung und den Abtrag von Schnee auf der Oberfläche des nördlichen Eisfelds seit 2000 mit ins Eis eingebohrten Stangen gemessen. Demnach war die Massenbilanz dort in zwei Jahren praktisch ausgeglichen und 2006 sogar positiv. Anomalien der Oberflächentemperatur des Indischen Ozeans hatten gegen Ende 2006 und Anfang 2007 für außergewöhnlich viele und ergiebige Regenfälle über Ostafrika gesorgt. Monatelang lag dann ein großer Teil der Gipfelregion des Berges unter einem weißen Laken.

Bedeutung von Neuschnee

Nur Schneefall auf die horizontale Oberfläche kann dem Plateaueis Masse zuführen. Er greift aber auch in die Energiebilanz ein – und zwar vor allem durch seine Häufigkeit. Neuschnee wirft wegen seines hohen Reflexionsvermögens nämlich einen großen Teil der Solarstrahlung, die am Kilimandscharo ja die Hauptenergiequelle ist, ungenutzt in das Weltall zurück. Die Oberfläche von gealtertem oder verschmutztem Schnee ist dunkler und absorbiert deutlich mehr Sonnenlicht. Das fördert die Sublimation, erhöht aber auch die Möglichkeit zum Schmelzen bei Windstille. Allerdings gefriert eventuelles Schmelzwasser großenteils wieder, wenn es in tiefere Eisschichten sickert. Insgesamt geht dadurch nicht unbedingt Masse verloren. Diese Prozesse dominieren auch den Massenhaushalt der Hanggletscher und in der Tat tritt aus deren Zunge sowie am Fuß der Eiswände selten mehr als ein dünnes Rinnsal von Schmelzwasser aus.

Ein Vergleich mit historischen Fotografien zeigt, dass das Plateaueis des Kibo im Verlauf des 20. Jahrhunderts höchstens zehn Meter dünner geworden ist. Dieser Massenverlust lässt sich mit einer zu geringen Schneezufuhr erklären. Das beobachtete Schrumpfen der Flächenausdehnung des Plateaueises hat dagegen praktisch ausschließlich an den vertikalen Rändern stattgefunden und beruht, wie oben erklärt, nicht auf geänderten Niederschlags- oder Temperaturbedingungen.

Aber auch bei den Hanggletschern unterscheidet sich die Massenbilanz von derjenigen anderer Gebirgsgletscher. Letztere verlieren in der Regel die meiste Substanz auf den Zungen und wenig oder gar keine darüber. Die Hanggletscher des Kibo schrumpfen dagegen sowohl von oben als auch von unten. Ihre Geschichte lässt vermuten, dass sie schon um 1900 viel zu trocken und weit von einem Gleichgewicht entfernt waren. Derzeit scheint sich ihr Rückgang allerdings zu verlangsamen. Dies und die gewölbte Form der Gletscher deuten an, dass sie in einem kleineren Eisvolumen endlich ein Gleichgewicht mit der trockenen Umgebung finden könnten.

Verantwortlich für den seit 123 Jahren zu beobachtenden Gletscherschwund auf dem Kilimandscharo ist also nicht eine stetige Erwärmung der Atmosphäre, sondern eine anhaltende Trockenheit. Die Hanggletscher scheinen in dieser Situation jetzt nach vielen Jahrzehnten ein Gleichgewicht zu finden, die Plateaugletscher mit den vertikalen Wänden können das allerdings nicht.

Die Prozesse, die den Eisverlust auf dem Kilimandscharo verursachen, sind weit gehend unabhängig von der Temperatur und somit von der globalen Erwärmung. Sollten die Lufttemperaturen allerdings irgendwann über den Gefrierpunkt steigen, gewännen der Zustrom fühlbarer Wärme und die langwellige Ausstrahlung aus der Atmosphäre gegenüber dem Sonnenlicht und der Sublimation die

Literatur

Kilimanjaro Glaciers: Recent areal extent from satellite data and new interpretation of observed 20th century retreat rates. Von N. J. Cullen et al. in: Geophysical Research Letters, Bd. 33, L16502, 2006

Extracting a climate signal from 169 glacier records. Von J. Oerlemans in: Science, Bd. 308, S. 675, 29. 4. 2005

Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: observations and facts. Von G. Kaser et al. in: International Journal of Climatology, Bd. 24, S. 329, 2004

Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. Von T. Mölg und D. R. Hardy in: Journal of Geophysical Research, Bd. 109, D16104, 2004

Solar-radiation-maintained glacier recession on Kilimanjaro drawn from combined ice-radiation geometry modeling. Von T. Mölg et al. in: Journal of Geophysical Research, Bd. 108(D23), S. 4731, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912780

Oberhand. Dann würden alle scharfkantigen Formen wie die vertikalen Ränder des Plateaueises bald abgerundet. Die Eiswände existierten laut Bericht der Erstbesteiger aber schon 1889. Damals war die bis heute andauernde und nicht mehr aufzuhaltende Schrumpfung des Plateaueises also bereits vorprogrammiert.

Rettung durch die Erderwärmung?

Seespiegelstände des nahe gelegenen Victoriasees und andere Indikatoren weisen darauf hin, dass die Niederschläge in Ostafrika nach einigen ziemlich regenreichen Jahrzehnten gegen Ende des 19. Jahrhunderts stark zurückgingen. Demnach war der große Eiskörper am Kilimandscharo, den die Forscher damals beschrieben, sehr wahrscheinlich mehr das Produkt einer ungewöhnlich feuchten und damit schneereichen Periode als eines kühleren Klimas. Mit dem Einsetzen von trockeneren Bedingungen, die bis heute anhalten, begann die Entwicklung der steilen Eiswände – und damit der kontinuierliche Rückzug der Plateaugletscher. Wenn überhaupt, hat eine lokale Erwärmung der Atmosphäre erst sehr spät und in einem in den Schrumpfraten nicht erkennbaren Maß dazu beigetragen.

Das schließt einen indirekten Zusammenhang zwischen dem Massenverlust der Gletscher am Kibo und der globalen Erwärmung allerdings nicht prinzipiell aus. Es gibt für die letzten 200 Jahre deutliche Hinweise auf eine Korrelation zwischen der Oberflächentemperatur des Indischen Ozeans und den atmosphärischen Zirkulations- und Niederschlagsmustern über Ostafrika, die das Eis auf dem Kilimandscharo entweder aufbauen oder aushungern.

Diese Muster haben sich freilich das letzte Mal schon Ende des 19. Jahrhunderts umgestellt – von üppig auf karg. Der massive Ausstoß von Treibhausgasen durch den Menschen begann erst später und kommt als Ursache der Umstellung deshalb nicht in Frage. Er kann das veränderte Zirkulationsmuster erst in den letzten Jahrzehnten beeinflusst und somit höchstens teilweise zum jüngsten Eisrückgang am Kibo und nur minimal zum gesamten Schwund beigetragen haben.

Ist die weiße Haube des Kilimandscharo dem Untergang geweiht? Sehr wahrscheinlich ja. Auch eine mäßige Zunahme des Niederschlags brächte keine Abhilfe. Auf dem Eis kann sich Neuschnee zwar über Monate oder Jahre hinweg ansammeln, auf dem umliegenden felsigen Plateau aber sublimiert oder schmilzt er in der Regel innerhalb weniger Tage (mit der erwähnten Ausnahme Ende 2006/Anfang 2007). Das Sonnenlicht durchdringt die dünne Schneedecke, erwärmt den Boden darunter und schmilzt den Schnee. Kommt dann an exponierten Stellen der dunkle Fels zum Vorschein zehrt ein sich selbst verstärkender Prozess schnell die gesamte Schneedecke auf.

Rettung könnte paradoxerweise vielleicht sogar die globale Erwärmung bringen. Sollten die Lufttemperaturen am Kilimandscharo zeitweise über den Gefrierpunkt steigen, würden fühlbare Wärme und Infrarotstrahlung aus der Atmosphäre die Eiskanten glätten und aus den Steilwänden schräge Hänge machen. Nähme zugleich die Niederschlagsmenge zu, könnte Schnee, der sich dort anhäuft, dem Plateaugletscher zum seitlichen Wachstum verhelfen.

Auch denkbar und realistischer ist ein anderes Szenarium: Die dunkle Ascheoberfläche des Kilimandscharo wird durch außergewöhnlich starken Schneefall, wie er Ende 2006/Anfang 2007 auftrat, so dick zugedeckt, dass bis zur nächsten feuchten Jahreszeit eine geschlossene Schneedecke bestehen bleibt. Darauf könnte sich jeder weitere Schneefall gut halten. Dann bestünde plötzlich die Chance für den Aufbau einer neuen, großflächigen Eisschicht. Ein solches »Wunder« geschähe, wie uns die Glaziologie lehrt, weder zum ersten noch zum letzten Mal. ◁

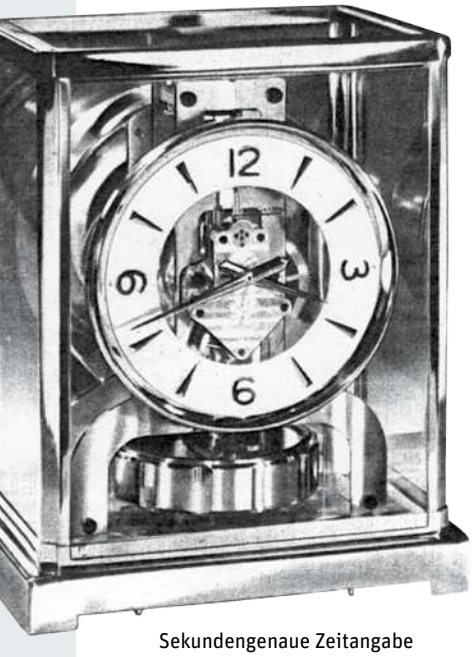
Bis zu 40 Meter hohe Eiswände erheben sich am Gipfel des Kilimandscharo. Im Vergleich dazu erscheint der Wissenschaftler, der vor dem Südrand des Nördlichen Eisfelds gerade Instrumente abliest, als Zwerg (links). Die zurückweichenden Eiswände hinterlassen oft schmale, isolierte Kämme (rechts), die schließlich so dünn werden, dass sie umkippen.

Georg Kaser (rechts) ist Außerordentlicher Professor am Institut für Geographie der Universität Innsbruck. Er hat Gletscher rund um den Erdball untersucht – speziell solche in den Tropen. Derzeit ist er Präsident der International Association of Cryospheric Sciences in der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik. Von ihm und Henry Osmaston ist 2002 das Buch »Tropical Glaciers« erschienen.

Philip W. Mote (links) ist Professor für Atmosphärenforschung an der Universität von Washington in Seattle. Er hat 2000 ein Buch über Klimasimulationen publiziert. Zusammen mit Kaser war er Hauptautor für den vierten Bericht des UN-Klimarats IPCC.

© American Scientist

1958



Sekundengenaue Zeitangabe ohne Aufziehen

Eine Uhr ›lebt‹ von Luft

»›Atmos‹, eine neue Standuhr, läuft von selbst, solange die Welt von einer Lufthülle umgeben ist. Die Energiequelle … ist ein Balg, der mit Äthyl-Chlorür gefüllt ist ... Wenn nun die Temperatur steigt, dehnt sich das Äthyl-Chlorür aus und drückt dadurch den Balg auseinander. Sinkt die Temperatur, so drückt diese Feder den Balg wieder zusammen. Diese horizontalen Bewegungen des Balges werden durch eine Kette auf eine Trommel übertragen, auf der sich die Kette auf- oder abrollt. Eine kleine Feder sorgt für ständige Spannung. Diese mechanischen Bewegungen genügen, um die Zugfeder der Uhr aufzudrehen … Ein Wärmeunterschied von einem Grad ... genügt, um die Uhr für 48 Stunden aufzuziehen« *Hobby, Nr. 1/1958, S. 71*

Schmeißfliegen mit Geschwindigkeitsmesser

»Für Schmeißfliegen der Art Calliphora erythrocephala konnte mit Hilfe elektrophysiologischer Untersuchungsmethoden nachgewiesen werden, daß die Antennen auch als Organe zur Anzeige der Fluggeschwindigkeit funktionieren … Infolge einer hohen, in der Nähe der Flügelfrequenz liegenden Resonanzfrequenz ist die Antenne in der Lage, Fluggeschwindigkeitsänderungen von nur 1 m/sec zu registrieren. Damit reicht die Empfindlichkeit des Fluggeschwindigkeitsorgans von Calliphora an die des menschlichen Ohres heran.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Jg. 11, Heft 1 1958, S. 27*

Radiostrahlung von der Venus

»Etwa ein Jahr nach der Entdeckung der Radiostrahlung des Jupiter wurde … als zweiter Plantet Venus als Radioquelle entdeckt … In Columbus arbeitete man mit 11 m Wellenlänge und entdeckte kurze Radioimpulse, die eine Ähnlichkeit mit denjenigen irdischer Gewitter haben. Teils handelt es sich um sehr kurze Stöße oder »bursts“ von Bruchteilen einer Sekunde, teils um längere Ausbrüche von einigen Sekunden Dauer mit einem langsamen Anstieg und einem sehr abrupten Ende. Die Ausbrüche traten oft in Gruppen auf, deren Gesamtdauer aber selten mehr als 5 bis 10 Minuten beträgt. In den Radioemissionen macht sich eine gewisse Periodizität bemerkbar, die vermutlich durch die Rotation der Venus zustande kommt« *Die Umschau, Jg. 1958, Nr. 1, S. 11, Januar 1958*

1908

Radioaktivität färbt Edelsteine um

»Herr Bordas hat … die Beobachtung gemacht, daß die Farben dieser Edelsteine willkürlich verändert und ineinander übergeführt werden können … Setzt man zum Beispiel einen bläulichen Saphir der Wirkung von stark aktivem Radiumchlorid aus, so ändert sich die Farbe in Grün, dann in Hellgelb und schließlich in Dunkelgelb … Diese sehr langsam vor sich gehende Farbenumwandlung der Korunde unter dem Einfluß von Radiumstrahlen kann durch direkte Berührung des Edelsteins mit dem Radiumsalz sehr beschleunigt werden, und sie erfolgt am Tageslicht ebenso gut wie im Dunkeln.« *Allgemeine Zeitung, Jg. 1908, Nr. 16, S. 127, 30. Januar 1908*

Homer bestätigt

»Das von Homer öfter erwähnte Verschlußsystem, nach dem die Oeffnung der Doppeltür durch einen großen, hakenförmigen Schlüssel, ihre Schließung durch einen Lederriemen erfolgte, hat sich im Tempeldienst lange erhalten … Nun … wurde bei einem der berühmtesten Tempel Griechenlands, dem Heiligtum der Artemis Hemera in Lusoi in Arkadien, ein Bronzeschlüssel von etwa 40,5 Zentimeter Länge aufgefunden, dessen Zugehörigkeit zu diesem Tempel durch eine schöne Inschrift …, etwa aus dem 5. Jahrhundert stammend, festgestellt ist.« *Allgemeine Zeitung, Jg. 1908, Nr. 15, S. 119, 29. Januar*

Fünf Stunden in giftiger Atmosphäre

»Während die besten bisher konstruierten Atmungsapparate den Aufenthalt … in der giftigen Atmosphäre nur kürzere Zeit gestatteten, ist man mit dem Tissot'schen Apparat imstande, 5 Stunden ohne … Atmungsbeschwerden auszuhalten … Tissot benutzt lediglich die Atmung durch die Nase und setzt zu diesem Zwecke zwei hermetisch schliessende Schläuche in die Nasenöffnungen ein. Der Strom der eingeatmeten Luft ist von der ausgeatmeten vollständig getrennt; letztere geht nach dem Regenerator und von dort nach einer in dem Tornister befindlichen Gummitasche. Eine Röhre enthält 300 l komprimierten Sauerstoff, den der mit dem Apparat Versehene … einatmet.« *Die Umschau, 12. Jg., Nr. 4, S. 76, 25. Januar 1908*

Zuverlässiger Atmungsapparat

Fraktale PERLEN

Drei Mathematiker haben ein über hundert Jahre altes Problem wieder aufgegriffen – mit Hilfe der Computergrafik. Das Ergebnis sind nicht nur hübsche Bilder, sondern auch Fortschritte in der komplexen Analysis – und ein neues Betätigungsfeld für Amateure.

Von Christoph Pöppe, Almut Pöppe und den Teilnehmern des Kurses »Indra's Pearls« der Deutschen SchülerAkademie, Hilden 2007

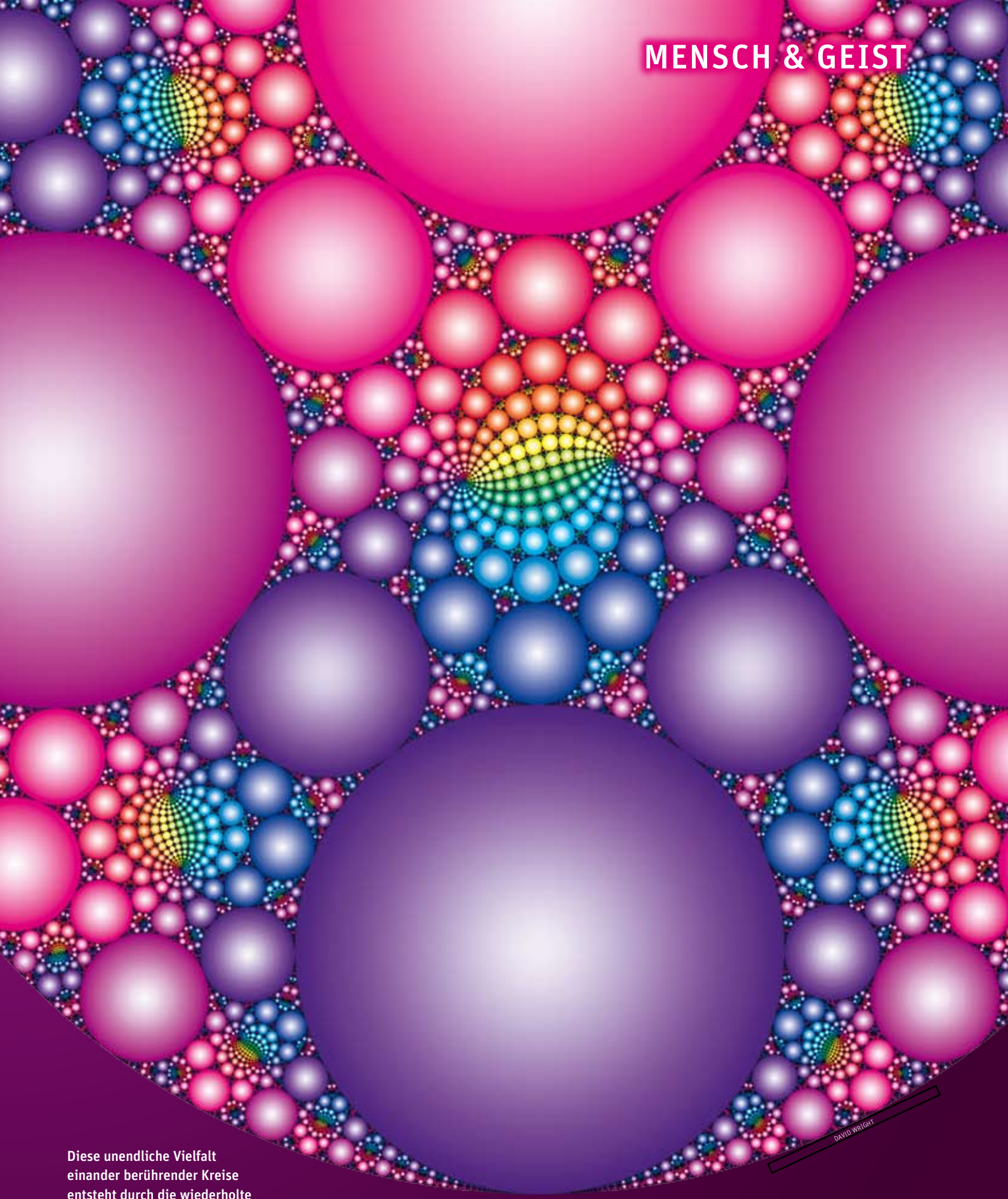
Unendlich viele Kreise füllen einen großen Kreis (Bild rechts), und zwar im Wortsinn lückenlos. Überall in diesem Bild finden sich »Ringe« von vier Kreisen, deren jeder seine beiden Nachbarn berührt. In dem Zwickel, der sich zwischen den vier Kreisen auftut, liegen wieder Kreise, von denen jeweils zwei zusammen mit zwei der ursprünglichen Ringkreise einen neuen Ring bilden – und so weiter bis ins Unendliche.

Darüber hinaus sieht man, prominent in der Bildmitte, »Quellen« und »Senken«: Punkte, aus denen eine Kette wachsender Kreise hervorsprudelt oder in die eine Kette immer kleiner werdender Kreise hineinstrudelt. Wer genauer hinsieht, findet solche Paare von Quellen und Senken in immer kleinerem Maßstab über das ganze Bild verteilt. Auf den zweiten Blick entdeckt man auch einen großen Kreis, der den untersten blauen Kreis und seine gleichfarbigen unmittelbaren Nachbarn umschließt und lauter Paare aus Quellen und Senken durchzieht, dort allerdings leicht deformiert ist. Viele weitere Strukturen lassen sich in den hier gezeigten – und weiteren im Internet zu findenden – Bildern entdecken.

Das Phänomen, dass sich immer wieder dieselben Strukturen in verschiedenen Größen finden, ist unter dem Namen »Selbstähnlichkeit« ein charakteristisches Merkmal jener Gebilde, die so überaus populär geworden sind, seit ihnen Benoît Mandelbrot in den 1970er Jahren den Namen »Fraktale« gab und ihre Gemeinsamkeiten aufzeigte. Die Fraktale sind jedoch deutlich älter als ihr Name. Ende des 19. Jahrhunderts hatten sich die Mathematiker auf breiter Front mit Mengen herumzuschlagen, die sie als »Monster« bezeichneten, weil ihre Eigenschaften jeder vernünftigen Erwartung widersprachen; heute würde man sie eben Fraktale nennen (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 72).

In Kürze

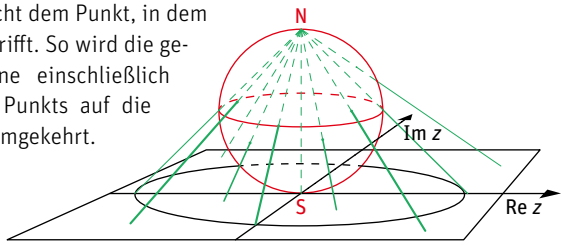
- Man kann ein **Fraktal** durch ein Bildungsgesetz definieren: Wende verschiedene Abbildungen immer wieder **(iteriert)** auf einen Punkt an. Das Fraktal ist dann die Menge der Grenzwerte aller möglichen Folgen solcher Abbildungen.
- In den Fraktalen dieses Artikels sind die iterierten Abbildungen **Möbius-Transformationen** (gebrochen-lineare Abbildungen) der komplexen Ebene.
- Die gut ausgebaute Theorie der Möbius-Transformationen erlaubt es, Fraktale mit **vorgegebenen Eigenschaften** zu erzeugen.



Diese unendliche Vielfalt einander berührender Kreise entsteht durch die wiederholte Anwendung von nur zwei geschickt gewählten Abbildungen der komplexen Ebene.

Stereografische Projektion

Man stelle sich eine (Hohl-)Kugel, die so genannte Riemann'sche Sphäre, vor, die auf der komplexen Ebene liegt. Der höchste Punkt der Kugel (der Nordpol) liegt genau über dem Ursprung. Vom Nordpol aus stechen wir in Gedanken Geraden durch die Kugel auf die Ebene. Der Punkt der Kugel, durch den die Gerade die Kugel verlässt, entspricht dem Punkt, in dem die Gerade die Ebene trifft. So wird die gesamte komplexe Ebene einschließlich des unendlich fernen Punkts auf die Kugel abgebildet und umgekehrt.



KATHARINA STOCK UND ANNIKA KOHLHAAS

Auch Felix Klein (1849–1925), der – neben vielen anderen Leistungen – für die Neuausrichtung der Geometrie im »Erlanger Programm« und für den Ausbau Göttingens zum Weltzentrum der Mathematik berühmt geworden ist, geriet in seinen Forschungen an solche Monster – und musste feststellen, dass sein Vorstellungsvermögen nicht ausreichte, sie zu erfassen. In einer Vorlesung über die räumliche Anschauung, die er 1893 an der Northwestern University in Evanston (Illinois) hielt, sagte er:

»Sei eine beliebige Anzahl von einander nicht schneidenden Kreisen gegeben. Man reflektiere jeden Kreis (durch Inversion, d. h. reziproke Radiusvektoren) an jedem anderen Kreis und wiederhole diese Operation ad infinitum.

Welche Konfiguration wird durch die Gesamtheit aller dieser Kreise gebildet, und wo liegen insbesondere die Grenzpunkte? Es ist nicht schwer, diese Fragen durch rein logisches Schlussfolgern zu beantworten; aber unsere Vorstellungskraft scheitert hoffnungslos, wenn wir uns ein geistiges Bild dieses Ergebnisses zu machen versuchen.«

Damit verfiel die Theorie dessen, was man wenig später »Klein'sche Gruppen« nannte, in einen Dornröschenschlaf. Es dauerte in der Tat ungefähr hundert Jahre, bis David Mumford von der Brown University in Providence (Rhode Island), Caroline Series von der University of Warwick in Coventry (Großbritannien) und David Wright von der Oklahoma State University in Stillwater (Oklahoma) Neues zum Thema fanden – und zwar mit Hilfe der modernen Computergrafik. Ihr Buch »Indra's Pearls« wurde von den Fachkollegen begeistert aufgenommen. Das lag nicht nur an den vielen schönen Bildern. Die Autoren haben auch etliche neue mathematische Ergebnisse gefunden, und zwar auf experimentellem Weg: indem sie mit dem Computer Bilder produzierten und deren ins Auge springende Eigenschaften dann mit klassisch-mathematischen Methoden zu beweisen versuchten.

Damit haben Mumford, Series und Wright auch ein ziemlich anspruchsvolles Feld der Mathematik für Amateure geöffnet. Wie bei den Julia- und Mandelbrot-Mengen vor gut zwanzig Jahren gelangt der Anwender über die Bilder zu einem Verständnis dieser merkwürdigen Gebilde, das er sich auf den klassischen theoretischen Weg, da viel zu mühsam, nie angeeignet hätte.

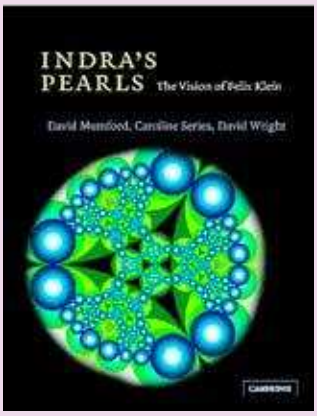
Bezeichnenderweise enthält der Klassiker »Die fraktale Geometrie der Natur« von Benoît Mandelbrot ein merkwürdig spitzendeckchenartiges Muster, das wenig Resonanz fand, weil Mandelbrot sich zum Bildungsgesetz nur sehr knapp geäußert hat. Das haben Mumford, Series und Wright in ihrem Buch nachgeholt.

In einem zweiwöchigen Kurs der Deutschen SchülerAkademie haben im vergangenen Sommer zwei Kursleiter und 16 Teilnehmer wesentliche Teile von »Indra's Pearls« durchgearbeitet, und zwar auch den wissenschaftlichen Hintergrund. Da mussten wir uns zunächst mit Dingen befassen, die nicht von sich aus reizvoll waren, sondern vielmehr heftig an den Schulunterricht erinnerten. Erst einmal muss man es lernen, bevor man auch nur eine Ahnung davon bekommt, wozu man sich die Mühe macht: Symmetrietransformationen, komplexe Zahlen mitsamt der Riemann'schen Zahlenkugel, ein bisschen Gruppentheorie, Möbius-Transformationen … Die attraktiven Bilder halfen uns über die Durststrecke hinweg, bis wir schließlich das Ergebnis unserer selbst geschriebenen Programme genießen konnten.

Auf den folgenden Seiten möchten wir Sie einladen, diesem Weg zu folgen – einschließlich der Durststrecke. Wenn Sie der Charme, sagen wir, der Matrixdarstellung für Möbius-Transformationen nicht auf der Stelle bezaubert: Na ja, das ist uns nicht besser gegangen. Ein Schraubenzieher ist nicht so schön wie das damit zusammengesetzte Möbelstück. Man lernt ihn erst zu schätzen, wenn man damit arbeitet.

Überraschend bekamen wir Hilfe von professioneller Seite. Jürgen Richter-Gebert, Mathematikprofessor an der Technischen Universität München, hat unseren Kurs zum Anlass genommen, ausgewählte Inhalte aus »Indra's Pearls« mit Hilfe seiner Geometrie-Software Cinderella in Java-Applets umzusetzen. So konnten wir mit der Maus an verschiedenen Parametern unserer Objekte herumspielen und den Effekt auf der Stelle am Bildschirm beobachten.

INDRAS PERLEN

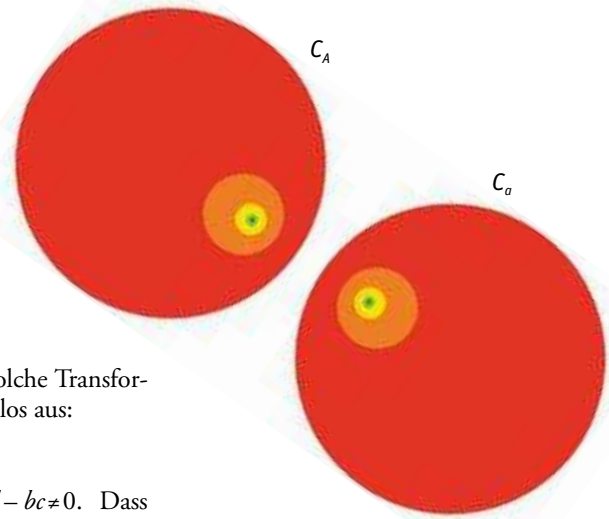


Nach einer alten Legende gibt es in dem Himmel des altindischen Gottes Indra ein unendlich ausgedehntes Netz, feiner als ein Spinnennetz und an jedem Kreuzungspunkt seiner durchsichtigen Fäden mit einer spiegelnden Perle versehen. In jeder Perle erscheinen so die Spiegelbilder aller anderen Perlen, die Spiegelbilder dieser Spiegelbilder, und so fort bis ins Unendliche.

WISSEN FÜR INSIDER

Von komplexen Zahlen bis zu wilden Kreisen

Die eindrucksvollen Bilder erfordern einerseits etwas Theorie, andererseits Erfahrung, die in Form gewisser Formeln (»Rezepte«) tradiert wird.



Eine Möbius-Transformation *a*, die das Äußere des Kreises C_A auf das Innere des Kreises C_a abbildet, erzeugt unter Iteration eine unendliche Folge von Kreisen innerhalb von C_a, die sich auf einen Punkt zusammenschnürt (oben). Ein Gleiches tut die zu *a* inverse Abbildung *A* im Kreis C_A. Mit zwei Paaren (*a*, *A*) und (*b*, *B*) solcher Transformationen und den zugehörigen Schottky-Kreisen ergibt sich eine größere Vielfalt solcher Folgen (unten). In diesen und den folgenden Bildern sind die Kreise nach der Anzahl der Abbildungen eingefärbt.

Der Zugang zu Indras Perlen verläuft über die komplexe Ebene. Wir fassen einen Punkt der Ebene nicht, wie gewohnt, als Paar (x, y) zweier reeller Zahlen auf, sondern als eine einzige »komplexe« Zahl namens $x+iy$. Man kann mit komplexen Zahlen fast so rechnen, wie man es mit den reellen gewohnt ist, wenn man nur beachtet, dass $i^2=-1$ ist. Es gibt Wurzeln aus negativen Zahlen (i ist eine Wurzel aus -1), und jede quadratische Gleichung hat zwei Lösungen (die in eine zusammenfallen können). Die x-Achse enthält die reellen Zahlen, die y-Achse die imaginären Zahlen (reelle Vielfache von i).

Rechenoperationen mit komplexen Zahlen haben geometrische Entsprechungen in der Zahlenebene: Eine komplexe Zahl $x+iy$ zu einem Punkt der Ebene zu addieren ist dasselbe wie eine Parallelverschiebung um den Vektor (x, y). Multiplikation mit einer komplexen Zahl z ist eine Streckung um den Betrag $|z|$ dieser Zahl, das heißt ihren Abstand vom Nullpunkt, gefolgt von einer Drehung um den Winkel, den z mit der reellen Achse bildet. Multipliziert man einen Punkt immer wieder mit z, so ergibt sich im Allgemeinen eine Spirale, die sich nach innen wickelt, wenn $|z|<1$ ist, und für $|z|>1$ bis ins Unendliche läuft.

Wenn wir auf alle Punkte einer geometrischen Figur, sagen wir eines Dreiecks, eine komplexe Addition oder Multiplikation anwenden, dann bleibt das Dreieck »im Wesentlichen«, das heißt bis auf Lage und Größe, erhalten. Alle Winkel bleiben unverändert, desgleichen der Drehsinn: Wenn im ursprünglichen Dreieck die Eckpunkte A, B und C im Gegenuhrzeigersinn aufeinander folgen, wie es der üblichen Bezeichnungsweise entspricht, dann gilt das auch für die Bildpunkte.

Es gilt nun, diesen (bekannten) Begriff der Ähnlichkeitsabbildung auf eine ganz besondere Weise zu verallgemeinern. Die Abbildungen, die für unsere Fraktale eine zentrale Rolle spielen, sind die gebrochen-linearen Abbildungen der komplexen Ebene; nach August Ferdinand Möbius (1790–1868) nennt man sie allgemein Möbius-Transformationen. Sie spielen in der komplexen Analysis eine zentrale Rolle. Die Formel für eine solche Transformation T sieht noch ganz harmlos aus:

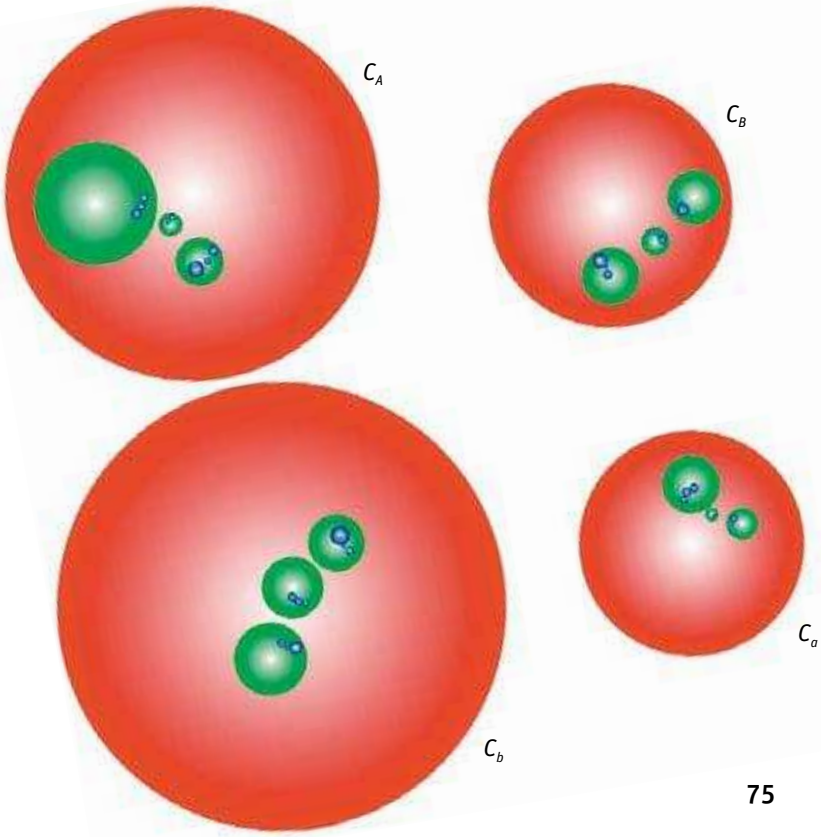
$$T(z)=\frac{az+b}{cz+d},$$

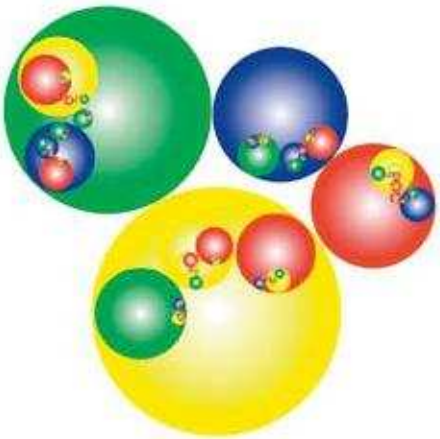
mit der Zusatzbedingung $ad-bc\neq 0$. Dass die gewöhnlichen Ähnlichkeitsabbildungen zu den Möbius-Transformationen zählen, sieht man, indem man $c=0$ und $d=1$ setzt.

Wenn aber nicht gerade $c=0$ ist, kann allerlei Neues passieren: Gerades bleibt im Allgemeinen nicht gerade. Allerdings bleiben nach wie vor Winkel zwischen zwei Kurven, das heißt, zwischen deren Tangenten im Schnittpunkt, erhalten, und der Drehsinn kehrt sich nicht um.

Der Nenner $cz+d$ kann null werden, sodass die Transformation in diesem Punkt nicht definiert wäre. Aber diese Ausnahme erledigt man auf elegante Weise: Man legt die komplexe Ebene – die dafür weit draußen gewaltig schrumpfen muss – um eine Kugel, die so genannte Riemann'sche Zahlenkugel, herum und bindet sie oben zu (»stereografische Projektion«, siehe Kasten links). Der Nordpol

BILDER DIESER SEITE: MARCEL HOYA





Die kleinen Kreise sind Bilder der großen Schottky-Kreise unter verschiedenen Produkten der Möbius-Transformationen *a*, *A*, *b* und *B*. Abweichend von den anderen Bildern dieses Artikels trägt hier jeder Kreis die Farbe seines Ursprungskreises.

der Kugel entspricht dem »unendlich fernen Punkt« der komplexen Ebene.

Das Schöne an der stereografischen Projektion ist: Ein Kreis auf der Ebene wird auf einen Kreis auf der Kugel abgebildet und umgekehrt. Die Mittelpunkte der Kreise werden allerdings im Allgemeinen nicht aufeinander abgebildet. Und Kreise, die durch den Nordpol gehen, werden zu Geraden in der Ebene.

Es ist ohnehin nützlich, Geraden als Sonderfälle von Kreisen aufzufassen. Auch eine Möbius-Transformationen bildet einen Kreis stets auf einen Kreis ab (nicht aber Mittelpunkt auf Mittelpunkt), wobei beide Kreise auch Geraden sein können.

Eine besonders interessante Möbius-Transformation ist $T(z) = 1/z$. Sie ist eine Inversion am Einheitskreis (das Innerste wird zuäußerst gestülpt und umgekehrt, siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 105, und 9/2004, S. 106), gefolgt von einer Spiegelung an der reellen Achse. Wenn man die Riemann-Kugel auf den Kopf stellt, entspricht das $T(z) = 1/z$.

Wenn man zwei Möbius-Transformationen nacheinander anwendet, ergibt sich wieder eine Möbius-Transformation, und jede Möbius-Transformation ist invertierbar (widerruflich): Die Möbius-Transformationen bilden eine Gruppe im Sinn der Gruppentheorie.

Das ist nützlich, wenn man einen »Wechsel der Perspektive« vornehmen will: Man bilde ein Objekt in der komplexen Ebene auf die Riemann'sche Kugel ab, rotiere die Kugel irgendwie und projiziere auf die komplexe Ebene zurück. Dann ist »von einem höheren Standpunkt aus« das Objekt immer noch dasselbe – das bisschen Rotieren tut nichts Wesentliches an ihm –, sieht aber unten in der Ebene völlig anders aus, vor allem wenn der unendlich ferne Punkt ins Endliche gewandert und ein anderer ins Unendliche verschwunden ist, wobei Geraden sich in Kreise verwandelt haben und umgekehrt. Dieser Wechsel der Perspektive lässt sich durch die Anwendung einer Möbius-Transformation S von links und ihrer Inversen S^{-1} von rechts, eine so genannte Konjugation, ausdrücken.

Zoo der Möbius-Transformationen

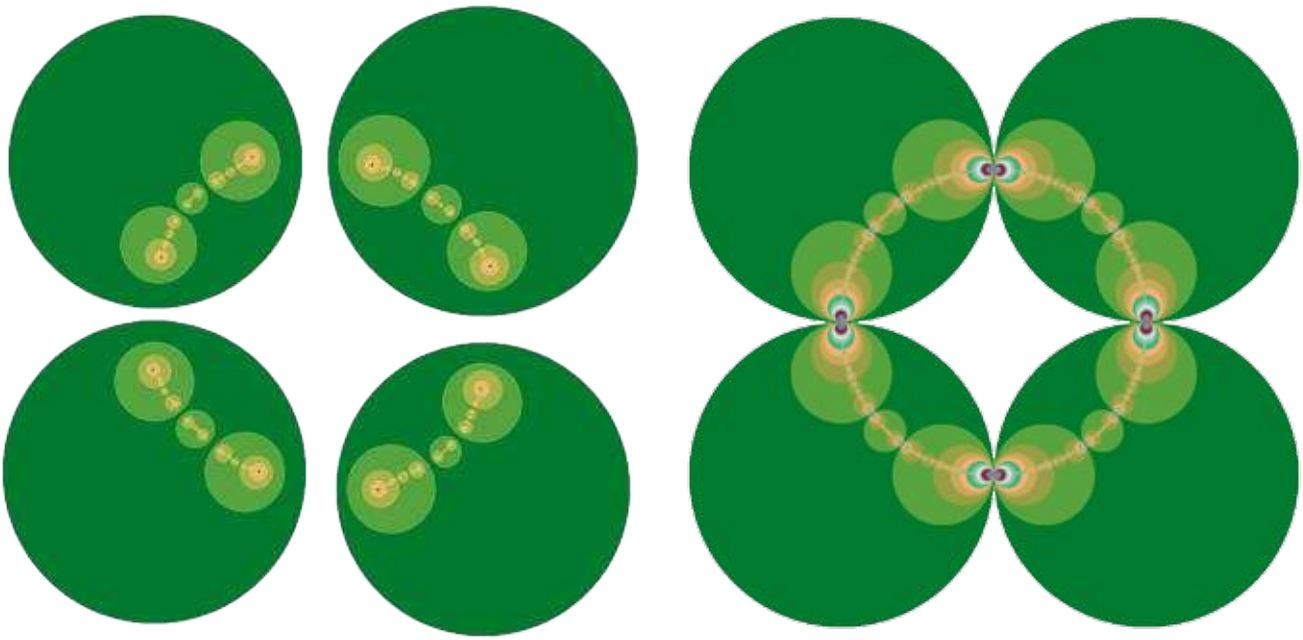
Für das Rechnen trifft es sich günstig, dass die Matrizen (die 2·2-Tabellen)

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix},$$

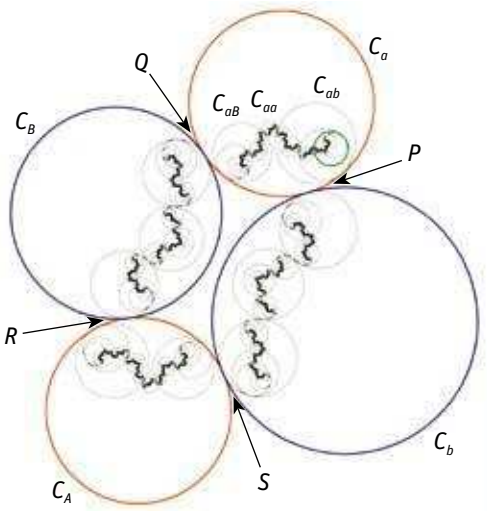
die man aus den Parametern a, b, c, d einer Möbius-Transformation bilden kann, sich genauso verhalten wie die Transformationen selbst: Die Multiplikation zweier solcher Matrizen entspricht der Komposition (Hintereinanderausführung) der zugehörigen Möbius-Transformationen. Allerdings ist von den vier Parametern einer überzählig, weil man den Bruch $(az+b)/(cz+d)$ erweitern oder kürzen kann, ohne dass sich an der Transformation etwas ändert. Zur Herstellung der Eindeutigkeit schreibt man vor, dass die Determinante der Matrix $ad - bc = 1$ sein soll. Das lässt sich durch Erweitern oder Kürzen stets erreichen.

An dieser Stelle steht der Mathematiker vor denselben Aufgaben wie der Zoologe, der eine völlig neue Tiergattung entdeckt hat: Er muss die neu gefundenen Tierchen in Klassen einteilen, um einigermaßen den Überblick zu behalten; dabei wäre es am schönsten, wenn er die Klassenzugehörigkeit an einem leicht

Die aus lauter isolierten Punkten bestehende Grenzpunktmenge (links, helle Punkte) schließt sich zu einer zusammenhängenden Kurve (rechts), wenn die Schottky-Kreise sich berühren (»küssen«) und eine Zusatzbedingung (Bild S. 77) erfüllt ist. Die im Allgemeinen unendlich verkrumpelte Kurve wird ein Kreis, wenn die vier Schottky-Kreise gleich groß und im Quadrat angeordnet sind.



BILDER DIESER SEITE: MARCEL HOYA



DAVID MUMFORD, CAROLINE SERIES UND DAVID WRIGHT / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

erkennbaren Merkmal feststellen könnte. Und er will wissen, wie man Tierchen mit bestimmten erwünschten Eigenschaften züchtet.

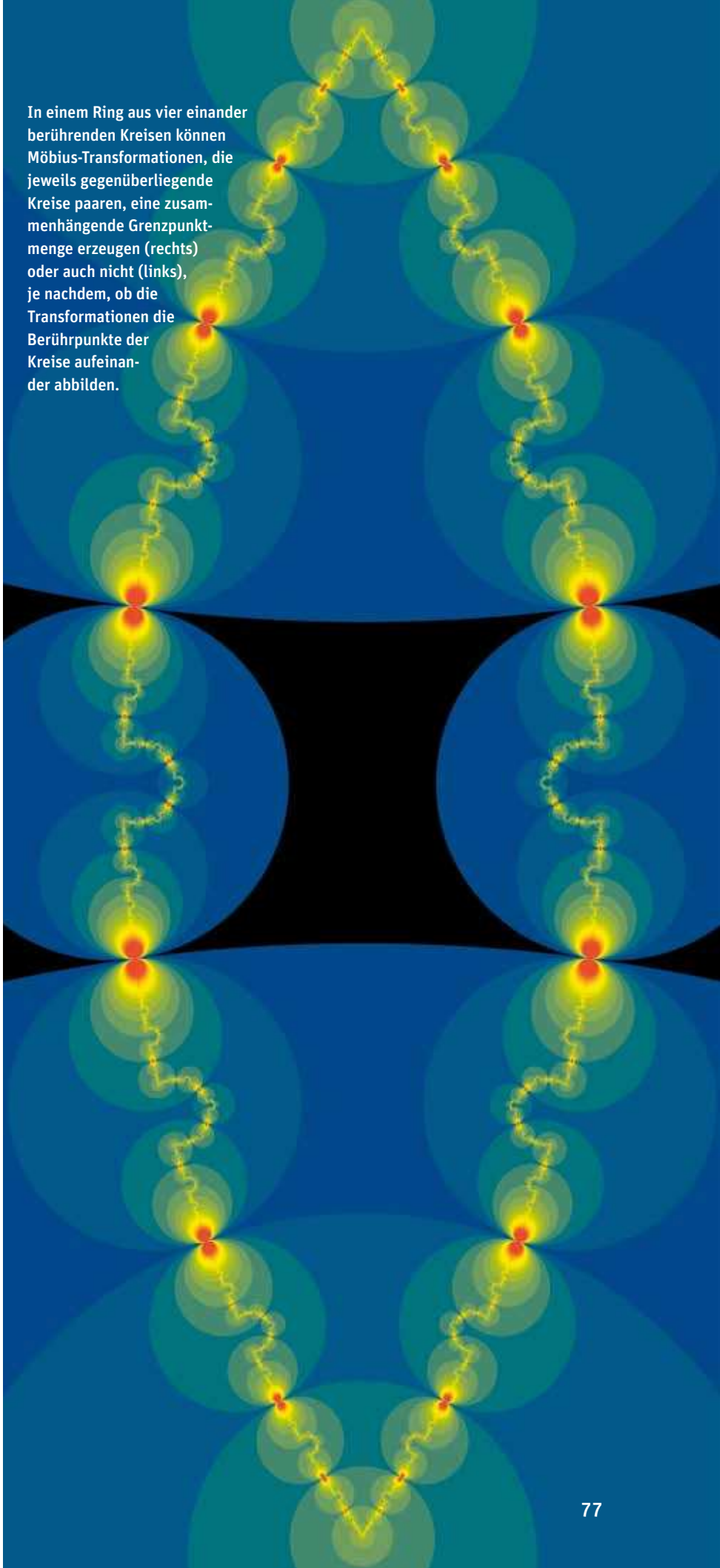
Das erste Problem lässt sich in befriedigender Form lösen. Bis auf Konjugation – den oben angesprochenen Wechsel der Perspektive – ist jede Möbius-Transformation eine Ähnlichkeitsabbildung, und man erkennt die Klassenzugehörigkeit an einem einzigen Zahlenwert, der so genannten Spur. Für Möbius-Transformationen, die auf Determinante 1 normiert sind, ist die Spur gleich $a+d$.

Zugleich gibt die Klassenzugehörigkeit Auskunft über das Verhalten eines Punktes z, wenn man die Transformation T immer wieder auf ihn anwendet. Die Punktfolge z, $T(z)$, $T(T(z))$, $T(T(T(z)))$, … strebt gegen einen Punkt z_0, für den $T(z_0)=z_0$ ist, einen so genannten Fixpunkt von T. Ein Gleiches gilt für die Folge der Punkte, auf die man das Inverse T^{-1} an Stelle von T anwendet. Der erste Fixpunkt heißt anziehender Fixpunkt oder Senke, der zweite abstoßender Fixpunkt oder Quelle, weil aus ihm die Punkte der Folge herauszusprudeln scheinen. Einen Fixpunkt zu berechnen läuft auf die Lösung einer quadratischen Gleichung hinaus, und das ist in den komplexen Zahlen ja stets möglich.

▸ Transformationen, deren Spur gleich 2 oder –2 ist, heißen parabolisch. Sie sind konjugiert zu Translationen und haben nur einen einzigen Fixpunkt, der zugleich Quelle und Senke ist.

▸ Wenn die Spur reell ist und zwischen –2 und 2 liegt, heißt die Transformation elliptisch, ist konjugiert zu einer reinen Drehung und hat zwei Fixpunkte, die weder Quelle noch Senke sind. Bei einer Drehung um den Ursprung sind das die Punkte 0 und ∞; denn es gibt keine Punktfolge, die aus ihnen heraus- oder in sie hineinströmt.

▸ Alle anderen Abbildungen sind konjugiert zu Drehstreckungen und heißen loxodromisch. Unter ihrer Anwendung bewegen sich Punkte auf spiralförmigen Bahnen von Quelle zu Senke. Eine Unterklasse sind die hyperbo-



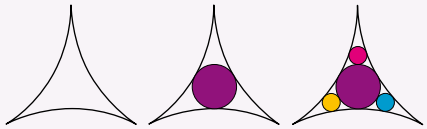
In einem Ring aus vier einander berührenden Kreisen können Möbius-Transformationen, die jeweils gegenüberliegende Kreise paaren, eine zusammenhängende Grenzpunktmenge erzeugen (rechts) oder auch nicht (links), je nachdem, ob die Transformationen die Berührpunkte der Kreise aufeinander abbilden.

TAMÁS KORODI

Apollonische Kreispackungen

Man nehme drei sich berührende Kreise. Dabei dürfen, wie üblich, einer oder zwei der Kreise auch Geraden sein. Diese umschließen ein Dreieck aus Kreisbögen, dessen Innenwinkel alle gleich null sind. Ein solches Dreieck nennt man ideal. Wenn man jetzt den Inkreis dieses idealen Dreiecks konstruiert, bleiben drei neue ideale Dreiecke übrig.

Diesen Vorgang wiederhole man beliebig oft. Wenn zwei der ursprünglichen Kreise im Inneren des dritten liegen, entsteht eine so genannte apollonische Kreispackung, die auf den antiken Geometer Apollonios von Perga (262–190 v. Chr.) zurückgeht (Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 116, und 9/2004, S. 106).



Dieselbe Konstruktion mit geraden statt krummen Linien läuft darauf hinaus, aus einem – zum Beispiel – gleichseitigen Dreieck nicht den Inkreis herauszustanzen, sondern das Dreieck, das die Seitenmittelpunkte verbindet. Von dem gleichseitigen Dreieck bleiben dann drei ebenfalls gleichseitige Dreiecke mit der halben Seitenlänge übrig, und das Verfahren führt auf eines der elementarsten Fraktale überhaupt: das Sierpiński-Dreieck.

OBEN: KAROLINE BÜDEL; UNTEN: MARCEL HOYA

lischen Abbildungen, die zu reinen Streckungen konjugiert sind; ihre Spur ist reell, und die Spiralen entarten zu Kreisen.

Auch die zweite Aufgabe ist lösbar: Man findet Formeln für Transformationen, die einen beliebigen Kreis auf einen beliebigen anderen Kreis abbilden. Beide Kreise können Geraden sein. Man kann auch bestimmen, ob das Innere des ersten Kreises auf das Innere oder auf das Äußere des zweiten Kreises abgebildet werden soll. Und dann gibt es immer noch viele Transformationen, die diese Aufgabe erfüllen. Man kann nämlich zu beliebigen drei Punkten (die einen Kreis definieren) angeben, auf welche drei Punkte (die ihrerseits wieder einen Kreis definieren) sie abgebildet werden sollen.

So entstehen Fraktale

Damit steht nun das Werkzeug zur Verfertigung unserer Fraktale bereit; es will nur noch richtig angewendet werden. Ein und dieselbe Abbildung immer wieder anzuwenden (zu »iterieren«) ist ein Standardrezept zur Erzeugung von Fraktalen. Wenn wir auf einen Urkreis, nennen wir ihn C_A, eine Möbius-Transformation namens a anwenden, erhalten wir einen Kreis, den wir C_a nennen, und wenn wir diesen Prozess iterieren, eine unendliche Folge von Kreisen C_a, $a(C_a)$, $a(a(C_a)) = a^2(C_a)$, $a(a(a(C_a))) = a^3(C_a)$, …, die sich auf eine Senke von a hinbewegen werden – wenn es eine Senke gibt. Wenn zusätzlich a das Äußere von C_A in das Innere von C_a abbildet, sagen wir, dass a die beiden Kreise C_A und C_a »paart«. In diesem (wichtigen) Fall muss jeder Kreis aus der Folge im Inneren seines Vorgängers liegen, und die Folge der Kreise schnürt sich auf den anziehenden Fixpunkt zusammen. Denselben Prozess kann man in Gegenrichtung durchführen. Wir schreiben A für das Inverse von a (weil dauernd a^{-1} zu schreiben umständlich ist); wenden wir A iteriert auf C_a an, so ergibt sich eine Folge ineinander liegender Kreise innerhalb von C_A, die sich auf den abstoßenden Fixpunkt von a zusammenschnürt.

Diese doppelt unendliche Folge von Kreisen (Bild S. 75 oben) sieht noch nicht besonders erregend aus und kann vor allem nicht eine Fläche mit Kreisen füllen. Aber mit einem zweiten Paar von Kreisen C_b und C_B sowie den zugehörigen Möbius-Transformationen b und $B = b^{-1}$ kommt mehr Bewegung ins Bild. Alle vier Kreise sollen sich nicht schneiden. Dann bildet die Transformation a nicht nur C_A selbst, sondern auch noch C_b und C_B ins Innere von C_a ab. Diese drei Kreise werden durch die drei Transformationen a, b und B wiederum ins Innere ihrer jeweiligen Zielkreise abgebildet; nur A bringt nichts Neues, sondern widerruft den Effekt von a (Bild S. 75 unten).

Damit können wir jetzt nicht nur eine Transformation unendlich oft anwenden, sodass nur noch ein Grenzpunkt übrig bleibt; es dürfen beliebige Folgen der Transformationen a, b, A und B sein. Das lässt sich mit den Mitteln der Gruppentheorie beschreiben: Die beiden Möbius-Transformationen a und b erzeugen eine Untergruppe der Möbius-Transformationen, die so genannte Schottky-Gruppe.

Formal nennen wir eine Folge von Symbolen aus einem begrenzten Vorrat (»Alphabet«), wie zum Beispiel dem Alphabet $\{a, b, A, B\}$, ein Wort. Das Produkt aus zwei Wörtern wird gebildet, indem man die beiden Wörter einfach aneinanderhängt. Die Wörter aA, Aa, bB und Bb sind sämtlich gleich dem neutralen Element der Gruppe (dem »leeren Wort«) und dürfen weggelassen werden. Danach wird zum Beispiel das Wort $abBAbaB$ über $aAbaB$ zu baB vereinfacht. Für unendliche Wörter, die irgendwann periodisch werden, existiert die Kurzdarstellung mit dem Querstrich, die man von den periodischen Dezimalzahlen kennt: $ababababab\ldots = \overline{ab}$, $BabAAbabAbAbAbAbAbA\ldots = BabAAbab\overline{A}$.

Wenn nun a und b unsere beiden Möbius-Transformationen sind und $a_1a_2a_3a_4\ldots$ ein unendliches Wort ist, dann konvergiert die Folge a_1z, a_1a_2z, $a_1a_2a_3z$, … für alle komplexen z (mit Ausnahme einiger exotischer Sonderfälle) gegen einen Grenzpunkt. In unserer lässigen Sprechweise identifizieren wir ein un-

endliches Wort mit seinem Grenzpunkt. Interessant ist die Menge aller Grenzpunkte.

Wenn man eine der Transformationen a, b, A, B auf einen Grenzpunkt anwendet, erhält man wieder einen Grenzpunkt. Tut man das für eine Teilmenge der Grenzpunktmenge, so kommt wieder eine Teilmenge der Grenzpunktmenge heraus, und zwar im Allgemeinen eine andere. Alle Teilmengen sind von derselben Struktur wie die Menge selbst: Sie ist selbstähnlich – eine charakteristische Eigenschaft von Fraktalen.

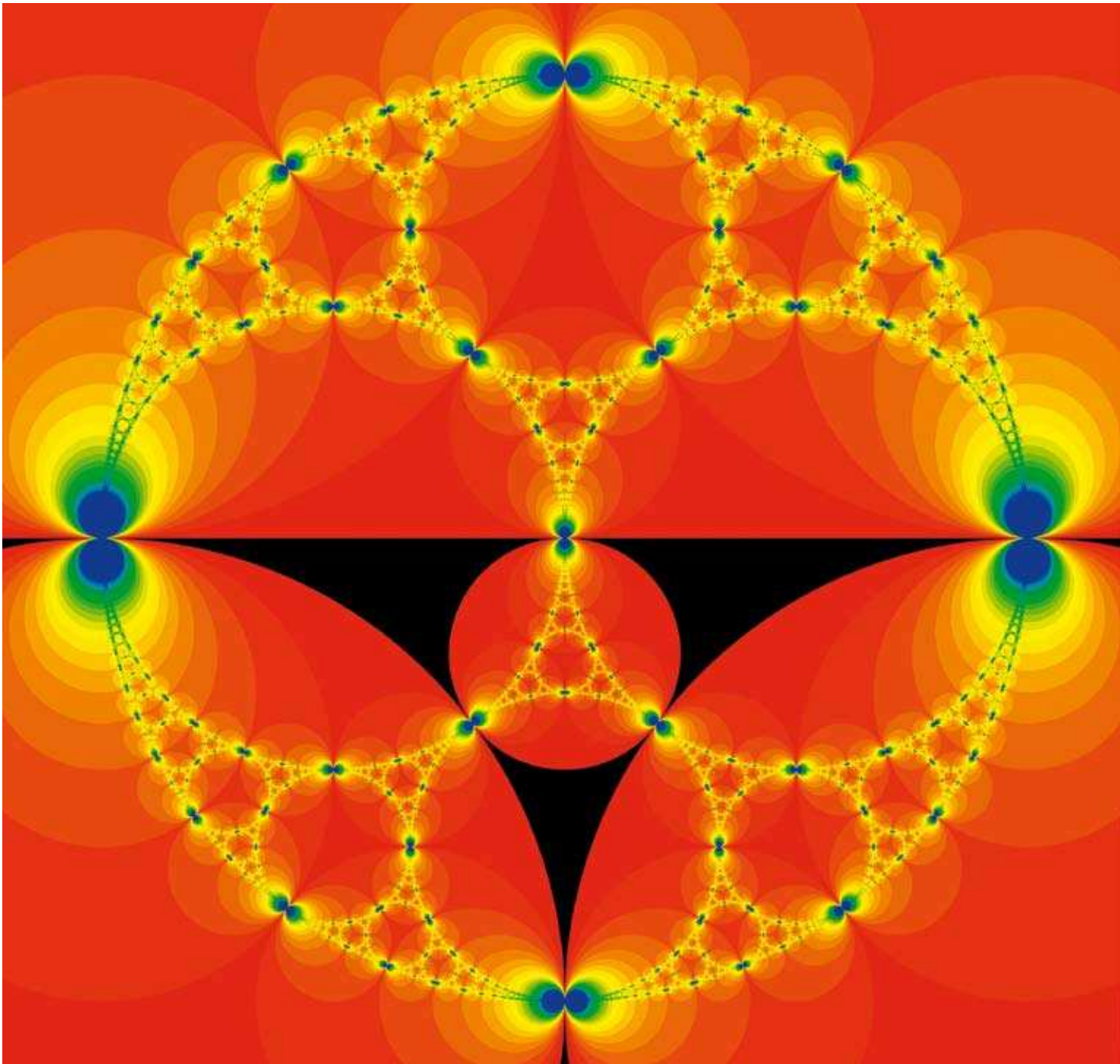
Grenzpunkte kann man ausrechnen, ohne dafür unendlich oft irgendwelche Transformationen anwenden zu müssen. Für ein periodisches Wort $\overline{T}$ ist der Grenzpunkt der anziehende Fixpunkt von T. Aus ihm kann man auch Grenzpunkte von Wörtern ausrechnen, die erst ab einer gewissen Stelle periodisch sind. Die Grenzpunkte anderer Wörter muss man durch nahegelegene Grenzpunkte periodischer Wörter annähern.

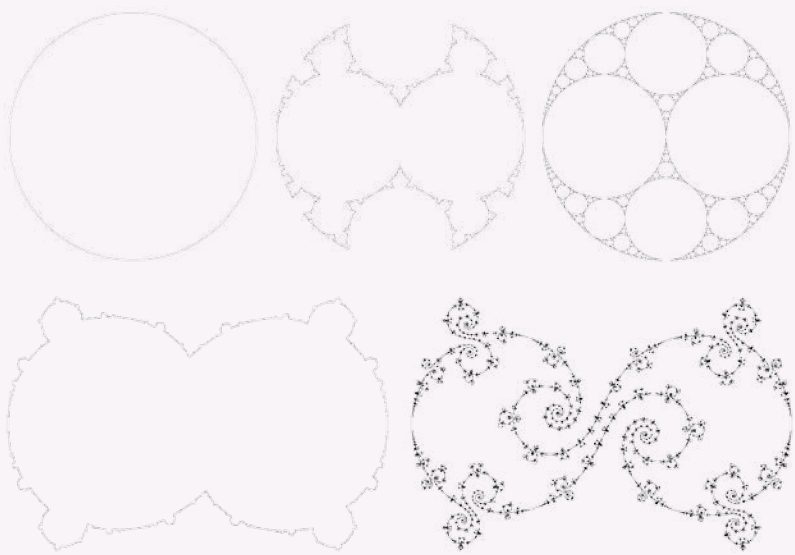
Küssende Kreise

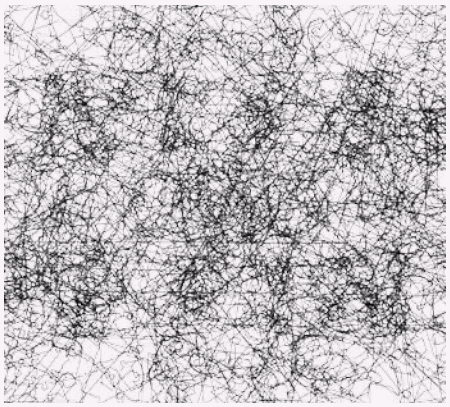
Bisher waren unsere vier Kreise nur gepaart. Richtig schön wird es erst, wenn sie sich küssen (berühren), und zwar nicht den Paarungspartner, sondern die beiden anderen! Dann nämlich berührt – zum Beispiel – das Bild von C_B unter der Transformation a den Kreis C_a von innen, weil C_B den Kreis C_A von außen berührt, und so weiter. Das Muster der einander küssenden Kreise bleibt unter weiteren Transformationen erhalten. Wenn zusätzlich die Berührpunkte der vier Urkreise durch a, b, A und B aufeinander abgebildet werden,

Das «glühende Nudelsieb» ist eine Grenzpunktmenge zu vier Kreisen, von denen jeder die drei anderen berührt. Es handelt sich um die vier Kreise, die an die schwarzen Felder angrenzen: einen kleinen in der Mitte sowie zwei angeschnittene rechts und links unten; der vierte (oben) ist zu einer Geraden entartet. In diesem Bild ist nicht nur die Grenzpunktmenge gezeichnet worden, sondern alle Bildkreise. Deren Farbe ändert sich bei jeder Iteration von Rot über Gelb zu Blau mit dem Effekt, dass die Grenzpunkte farblich hervorgehoben sind.

TAMÁS KORODI







Oben Grenzpunktmengen für $t_a = t_b = x$ mit (von links nach rechts) $x = 3$; $x = 2{,}2$; $x = 2{,}0$: Ein Kreis deformiert sich allmählich bis zum glühenden Nudelsieb. Darunter Grenzpunktmengen für $t_b = 3$; $t_a = x + 0{,}05i$ mit $x = 2{,}2$ und $x = 1{,}91$; rechts für $x = 1{,}85$. Ziel des Programms scheint es in diesem Fall zu sein, die Zeichenfläche komplett schwarz auszumalen, was ihm bei unendlicher Laufzeit sicherlich auch gelänge.

CLAAS STRODTHOFF

wird die Grenzpunktmenge zu einer zusammenhängenden Kurve (Bild S. 77)! Genau dann gilt nämlich mit den Bezeichnungen dieses Bilds $a(S) = P$, $b(R) = S$, $A(Q) = R$ und $B(P) = Q$. Aus dieser Gleichungskette folgt $abAB(P) = P$, das heißt, P ist ein Fixpunkt von $abAB$. Diese Abbildung heißt ein Kommutator der von a und b erzeugten Gruppe.

P muss der einzige Fixpunkt des Kommutators $abAb$ sein, da sonst die Kreise der verschiedenen Iterationsstufen nicht von beiden Seiten in P zusammenlaufen, sondern sich an einem weiteren Fixpunkt anhäufen würden. Da der Kommutator nur einen einzigen Fixpunkt hat, muss er eine parabolische Abbildung sein, insbesondere eine mit der Spur -2, wie man mit viel Mühe nachrechnen kann.

Statt nach P kann man die Gleichungskette nach jedem anderen Berührpunkt auflösen und erhält andere Kommutatoren. Diese sind zyklische Permutationen von $abAB$ oder von dessen Inversem $baBA$.

Im Punkt P treffen sich zwei unendliche Scharen von ineinander liegenden Kreisen: eine innerhalb von C_a und die andere innerhalb von C_b. Der Punkt P ist also Grenzpunkt zweier verschiedener unendlicher Folgen von Transformationen. Zwei unendliche Wörter unseres Baums bedeuten dasselbe; »ganz weit draußen im Unendlichen wachsen die Äste des Baums wieder zusammen«. Das gilt ebenso für die Punkte Q, R und S sowie für deren Bilder unter den unendlich vielen Möbius-Transformationen. Die Situation ist analog der ganz gewöhnlichen Dezimaldarstellung reeller Zahlen. Jeder abbrechende Dezimalbruch hat zwei verschiedene Darstellungen; zum Beispiel ist 2,70000… = 2,69999…

Wenn die Grenzpunktmenge eine geschlossene Kurve ist, die sich selbst nirgendwo berührt, nennt man sie einen Quasikreis. Sie zerlegt dann die komplexe Ebene in zwei Gebiete. Alle Möbius-Transformationen der Gruppe respektieren diese Grenze: Ein Punkt, der in dem einen Gebiet liegt, wird von keiner Transformation in das andere abgebildet.

Ein Quasikreis kann sogar ein ganz gewöhnlicher Kreis sein, zum Beispiel wenn alle vier Kreise gleich groß sind und ihre Mittelpunkte auf den Ecken eines Quadrats liegen (Bild S. 76 oben, rechts).

Glühendes Nudelsieb

Die Grenzpunktmenge kann sich jedoch auch selbst berühren; tut sie das an einer Stelle, dann tut sie das wegen der fraktalen Struktur an unendlich vielen Stellen. Aus dem gewöhnlichen Kreis des obigen Sonderfalls wird, wenn man die beteiligten Transformtionen etwas variiert, ein mehr oder weniger verkrumpelter Quasikreis, dann eine spitzendeckchenartige Struktur mit Selbstberührungen oder auch Zusammensetzungen aus unendlich vielen Kreisen – und das sind nicht die Bildkreise der Möbius-Transformationen (Bild S. 79, Bild links und Titelbild des Hefts).

Im Buch heißt diese Struktur »glowing gasket«, und ein *gasket* ist – unter anderem – ein Ablaufsieb mit verschieden großen Löchern für die Badewanne. Da fanden wir »Nudelsieb« einen appetitlicheren Ausdruck. Man gewinnt es aus vier sich küssenden Schottky-Kreisen, deren jeder alle drei anderen berührt. Dies ist nur möglich, wenn einer der Kreise in dem Zwickel zwischen den drei anderen liegt.

Wohlgemerkt: Die Grenzmenge ist nach wie vor eine zusammenhängende Kurve; aber sie läuft alle unendlichen Kreise ab, aus denen sie besteht, und zwar in einer sehr merkwürdigen Reihenfolge. Man glaubt es nicht, bis man die Kurve auf dem Bildschirm entstehen gesehen hat (siehe den Kurzfilm unter http://plus.maths.org/issue43/features/serieswright/gasketglow.mpg).

Es gibt übrigens bis auf Konjugation nur ein glühendes Nudelsieb. Denn es existiert stets genau eine Möbius-Transformation, die drei gegebene Punkte auf drei andere gegebene Punkte abbildet, und durch die drei Berührpunkte der äußeren Kreise ist das ganze Nudelsieb bereits eindeutig bestimmt.

Omas Rezept

Jede dieser Grenzpunktmengen – mitsamt der zugehörigen unendlichen Menge an Bildkreisen – ist durch die zwei erzeugenden Möbius-Transformationen a und b eindeutig bestimmt. Jede von ihnen ist durch drei komplexe Zahlen festgelegt. Das macht zusammen sechs komplexe oder zwölf reelle Zahlen – zu viel zum systematischen Durchprobieren. Aber indem man sich auf ein Bild aus einer großen Schar konjugierter Bilder festlegt und die Bedingung erfüllt, dass die Spur des Kommutators gleich –2 sein soll, bleiben von den sechs Zahlenwerten noch genau zwei übrig. Es erweist sich als zweckmäßig, für diese beiden Zahlen die Spuren t_a und t_b der Transformationen a und b zu wählen.

Aus diesen Überlegungen haben die Autoren von »Indra's Pearls« eine Formelsammlung gemacht, die sie »Omas Rezept« *(Grandma's recipe)* nennen; denn neben den bekannten Zutaten enthält es, wie bei Großmutterrezepten üblich, noch einige nicht näher beschriebene Gewürze zur Erzeugung besonders schmackhafter Bilder. Nach Omas Rezept sind die Bilder S. 80 berechnet. An dem »wilden« untersten Bild sieht man, dass die Grenzpunktmenge auch die ganze komplexe Ebene ausfüllen kann. Für welche Parameter das geschieht, dafür gibt es zwar einige Regeln, aber keine vollständige Antwort.

Andere interessante Dinge geschehen, wenn man bestimmt, dass gewisse Produkte wie $a^{15}b$ oder a^{10} parabolisch mit Spur –2 oder gleich der identischen Abbildung sein sollen. Nach einem solchen Rezept ist das Bild auf S. 72 gebaut. Auch die Autoren des Buchs haben die sich ergebenden Möglichkeiten noch längst nicht ausgeschöpft. ◁

Die Kursteilnehmer (Bild unten):

Sitzend v. l. n. r.: Eike Müller, Berlin; Kürsat Erincik, Dortmund; Tamás Korodi, Rosenheim; Annika Kohlhaas, Kaarst; Emre Türköz, Instanbul; Katharina Stock, Lindau; Anna Lu, Bochum; Karoline Büdel, München. Stehend: Kursleiter Christoph Pöppe, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft; Claas Strodthoff, Oyten; Markus Obmann, Saarburg; Marcel Hoya, Dortmund; Dana Graulich, Witten; Cornelie Koop, Mainz; Astrid Lange, Bad Salzuflen; Florian Wagenschwanz, Ottensoos; Joss Becker, Wuppertal; Kursleiterin Almut Pöppe, Studentin in Freiburg. Das Sierpiński-Tetraeder in der Mitte haben Teilnehmer der Akademie an einem der Abende zusammengebaut.

Literaturhinweis:

Die fraktale Geometrie der Natur. Von Benoît Mandelbrot. Birkhäuser, Basel 1991

Weblinks zu diesem Thema sowie die komplette Dokumentation des Kurses finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912781.

DEUTSCHE SCHÜLERAKADEMIE

wichtige **online** **adressen**

Brainlogs
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

KOSMOpod
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska
– Kunstmalerin –
www.kwasniewska.com

Platinnetz
das Netzwerk für die Generation der Jungebliebenen
www.platinnetz.de

WISSENSlogs
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de

»Wie Frösche um einen Teich«

Der Handel florierte, die Gemeinwesen wuchsen, kurz: Griechenland boomte im 8. Jahrhundert v. Chr. Und dennoch brachen Kolonisten zu neuen Gestaden auf – waren sie die Verlierer des Aufschwungs?

CORBIS

Mit sakralen Bauten wie dem Hera-Tempel von Poseidonia (heute Paestum) setzten griechische Kolonisten in Italien und Sizilien Maßstäbe.

Von Theodor Kissel

Die zackigen Zähne der Anker fesseln die Schiffe; den Strand bedecken sie Heck an Heck. Und mutig schwingt sich die Jugend, entflammt von heißer Begierde auf die hesperische Erde hinaus.« So schilderte der römische Dichter Vergil (70–19 v. Chr.) in seiner »Aeneis« die Ankunft der ersten Griechen in Italien. Scharenweise hatten Auswanderer zwischen 750 und 500 v. Chr., dem archaischen Zeitalter, Hellas verlassen, um in der Fremde eine neue Heimat zu finden. Fast zweihundert Siedlungen entstanden rings um das Mittelmeer und das Schwarze Meer, was den Athener Philosophen Sokrates (469–399 v. Chr.) spotten ließ: »wie Frösche um einen Teich«. Ein bunter Flickenteppich autonomer Gemeinwesen, unter denen die in Italien und auf Sizilien eine besondere Rolle spielen sollten. Schon in der Antike nannte man diese Region deshalb Magna Graecia – Großgriechenland.

Viel rätselten Altertumsforscher über die Gründe jener im 8. Jahrhundert v. Chr. einsetzenden »Großen Griechischen Kolonisation«. Handelsinteressen vermuteten die einen, Landmangel durch Überbevölkerung die anderen. Tatsächlich warnte der griechische Dichter Hesiod (geboren vor 700 v. Chr.) vor steigenden Bevölkerungszahlen und forderte Eltern auf, sich auf ein Kind zu beschränken. Wieder andere Forscher führten Dürreperioen und Ressourcenknappheit ins Feld. Oder war es manchmal auch schlicht Abenteuerlust? Der Kölner Althistoriker Karl Joachim Hölkeskamp betont, neben einem Unbehagen am Hier und Jetzt sei immer auch die Hoffnung mitgeschwungen, »jenseits der Enge und Begrenztheit der Heimat sich neue Handlungsspielräume zu erschließen und Reichtum und Einfluss zu gewinnen«.

Dabei erlebte Hellas eigentlich einen wirtschaftlichen, politischen und kulturellen Aufschwung. Es trat, wie Christian Meier von der Universität München es formulierte, »aus dem Schatten des Dunklen Zeitalters heraus und erfand die Welt neu«. Das Dunkle Zeitalter – jene vier Jahrhunderte also, die um 1200 v. Chr. mit dem Brand der minoischen Paläste begannen und in denen alle Schriftlichkeit verschwunden schien. Auch wenn Archäologen inzwischen manchen Befund zu Tage förderten, der diese Zäsur weniger dramatisch erscheinen lässt, machte Griechenland in der nun anbrechenden Epoche der Archaik doch einen gewaltigen Schritt in Richtung Hochkultur. Man erfand die Schrift, entdeckte das Individuum. Homer schrieb seine beiden Epen »Ilias« und »Odyssee« über die Helden des legendären Troianischen Kriegs und zum ersten Mal zeichneten Künstler ihre bemalte Keramik namentlich. Das alles vollzog sich im institutionellen Rahmen der Polis, jenen Stadtstaaten, die sich zu Beginn des 8. Jahrhunderts v. Chr. formierten und bald zur Wiege der Demokratie wurden.

Überall blühte der Handel und brachte Wohlstand. Umso unverständlicher also, dass Griechen gerade jetzt ihre Heimat verließen. Waren die Emigranten vielleicht – eine weitere Erklärung – Verlierer des Aufschwungs? Die wenigen erhaltenen Schriftquellen berichten von heftigen Auseinandersetzungen zwischen rivalisierenden Adelsgruppen, später zwischen Aristokraten und unteren Schichten. Die griechischen Siedler, so vermutete der Frankfurter Althistoriker Frank Bernstein 2004, suchten das Weite, um sozialen Konflikten zu entgehen.

Innere Distanz zur Mutterstadt

Denn eine wachsende Bevölkerung verursachte Probleme, für die jene früharchaische Gesellschaft Griechenlands keine Lösungen parat hatte. Es galt das Recht des Stärkeren und Konflikte wurden mit dem Schwert ausgetragen. Migration als Ventil für Bevölkerungsdruck und politischen Dissens? Eine These, die vieles für sich hat. Denn die Griechen nannten ihre Heimatstadt jeweils *metropolis*, Siedlungen außerhalb des Stammlands aber *apoikiai* (von Griechisch: *apo* »weg« und *oikia*, »Siedlung«), eine Terminologie, die laut Bernstein eine innere Distanz zur Mutterstadt zum Ausdruck brachte. Tatsächlich bezeichnete Platon (um 427–347 v. Chr.) Jahrhunderte später die Gründung von Apoikien als »altbewährtes Mittel bei Überbevölkerung, inneren Konflikten und bei Enge des Landes«.

Es waren Siedler der Attika benachbarten Insel Euböa, namentlich Bewohner von Chalkis und Eretria (siehe Karte nächste Seite), die sich als Erste gen Westen, nach Hesperia aufmachten – eine Reise ohne Rückfahrschein, nicht ungefährlich, doch kein Himmelfahrtskommando. Denn auch ohne Kompass und GPS gelangten die Griechen an ihr Ziel. Sie verstanden es, nach den Sternen zu navigieren, und sie profitierten von den Erfahrungen eines anderen großen Seefahrervolks, dessen Kapitäne bereits um 1000 v. Chr. durch das Mittelmeer kreuzten, den Phöniziern. Die zeichneten erste Seekarten, die *periploi*, und trugen darin Entfernungsangaben und Küstenbeschreibungen ein, zudem Informationen über Untiefen, Strömungen und signifikante Landmarken, die vom Meer aus gut zu sehen waren. Beschwerlich aber

Griechische Kolonien in der Magna Graecia

Vom 8. bis zum 6. Jahrhundert v. Chr. gründeten griechische Siedler Kolonien im Mittelmeerraum und an der Schwarzmeerküste. Die größte Dichte an Pflanzstädten wiesen Süditalien und Sizilien auf, diese Region hieß deshalb schon in der Antike ***Magna Graecia***, »Großgriechenland«.

war die Überfahrt allemal, denn die damaligen Segelschiffe vermochten nicht gegen die im Mittelmeer vorherrschenden Nordwestwinde zu kreuzen und waren deshalb oftmals Wochen unterwegs.

Die Exilanten aus Euböa gründeten um 770 v. Chr. die Siedlung Pithekussai auf der Insel Ischia im Golf von Neapel. Gut zwanzig Jahre später – alle Datierungen beruhen auf archäologischen Befunden – folgte in Süditalien Kyme, nach weiteren zwei Jahrzehnten die Städte wie Naxos und Syrakus auf Sizilien, zu den jüngsten Kolonien dieser ersten Phase gehörten Kroton um 710 und Taras um 706 v. Chr. in Süditalien. In den fruchtbaren Schwemmlandebenen Süditaliens und Siziliens fanden die Griechen, woran es in der Heimat mangelte: weitläufige Anbauflächen.

Meist waren es nicht mehr als hundert bis dreihundert Menschen, mitunter sogar aus verschiedenen Herkunftsorten, die sich zu einem Gemeinschaftsunternehmen zusammenschlossen (siehe Tabelle rechts). Rhegion beispielsweise war ein Joint Venture von Einwohnern der Stadt Chalkis und der Region Messenien auf dem Peloponnes. Solche Zusammenschlüsse hatten rein praktische Gründe: In Dörfern und Städten fanden sich oftmals nicht mehr als je zehn Ausreisewillige – oder Personen, die zum Exil verurteilt wurden wie jene Messenier, denen die Vergewaltigung spartanischer Jungfrauen in einem Heiligtum zur Last gelegt worden war.

Die Führer eines Siedlerzugs wurden *Oikisten* (vom Griechischen: *oikia*, »Siedlung« und *ktizein*, »gründen«) genannt. Es waren vornehmlich Adlige, die die Initiative ergriffen, Schiffe und Material organisierten. Vor der Expedition pilgerten sie zum Orakel von Delphi, dem wohl wichtigsten religiösen »Dienstleistungszentrum« der Antike, um dort den Rat des Gotts Apollo zu erbitten. Wie Irad Malkin, Professor für altgriechische Geschichte an der Universität Tel Aviv, Anfang der 1990er Jahre herausfand, hatte diese Audienz aber noch einen ganz anderen Grund: Man wollte sich das Unternehmen von höchster Stelle absegnen lassen. Denn ein derart heik-

Kolonie (heutiger Name)	Mutterstadt oder -landschaft	Gründungsjahr v. Chr. um
Pithekussai (Ischia)	Chalkis	770
Kyme (Cumae)	Chalkis	750
Naxos (Guardini Naxos)	Chalkis	734
Syrakus (Siracusa)	Korinth	733
Zankle (Messina)	Chalkis und Kyme	730
Katane (Catania)	Naxos	729
Leontinoi (Lentini)	Naxos	729
Megara Hyblaia	Megara Nisaia	728
Rhegion (Reggio di Calabria)	Chalkis und Messenien	730 – 720
Sybaris (Sibari)	Achaia	720 oder 710
Mylai (Milazzo)	Zankle	716
Kroton (Crotone)	Achaia	708
Taras (Tarent)	Sparta	706
Kaulonia (Caulonia)	Achaia	Ende 8. Jh. v. Chr.
Laos (bei Scalea)	Sybaris	Ende 8. Jh. v. Chr.
Pyxus (Policastro Bussentino)	Sybaris	Ende 8. Jh. v. Chr.
Skydros	Sybaris	Ende 8. Jh. v. Chr.
Siris	Kolophon	690 – 680
Gela	Rhodos und Kreta	688
Lokroi Epizephyrioi (Locri)	Lokrien	675 – 650
Akrai (Acre)	Syrakus	663
Himera (Imera)	Zankle	649
Kasmenai (Casmene)	Syrakus	643
Metapontion (Metapont)	Achaia	640 – 630
Selinis (Selinunt)	Megara Hyblaia	628
Poseidonia (Paestum)	Sybaris	600
Hipponion (Vibo Valentia)	Lokroi Epizephyrioi	Anfang 6. Jh. v. Chr.
Kamarina (Camarina)	Syrakus	598
Akragas (Agrigent)	Gela	580
Lipara (Lipari)	Knidos	580 – 576
Medma (Rosarno)	Lokroi Epizephyrioi	575
Hyele-Elea (Velia)	Phokaia	535
Dikaiarcheia (Pozzuoli)	Samos	531 v. Chr.
Skylletion (Scolacium)	Kroton	5. Jh. v. Chr.
Neapolis (Neapel)	Kyme	Anfang 5. Jh. v. Chr.
Terina (Sant' Eufemia Vetere)	Kroton	480 – 470
Thurioi	Gemeingriechische Kolonie	444/443
Herakleia (Eraclea)	Athen und Peloponnes	433

ler Akt wie die Inbesitznahme fremden Landes bedurfte antiken Vorstellungen zufolge göttlicher Zustimmung. Und die gewährte laut Malkin der pythische Apollo, auch *archegetes*, »Wegbereiter« genannt.

Er spielt auch in den *ktiseis*, den Gründungslegenden, eine wichtige Rolle, die zurzeit auf ihren historischen Kern erforscht werden. Beispielsweise überlieferte der Historiker Herodot (um 484 – 424 v. Chr.), die Bewohner der Kykladeninsel Thera hätten auf Geheiß des Gotts Haus und Hof verlassen und seien unter der Führung eines gewissen Battos nach Libyen aufgebrochen. Dazu wurde »in allen Ortschaften aus jedem Haushalt ein Sohn ausgewählt«, was auf Bevölkerungsüberschuss schließen lässt. Verschärft wurde die Situation möglicherweise durch eine Dürre, der Legende nach eine Strafe Apollos, dessen Weisung missachtet worden war. Schließlich gründeten die Auswanderer Kyrene, das zur größten griechischen Kolonie Afrikas heranwachsen sollte. Trockenheit als göttliche Strafe trieb wohl auch Korinther Bürger außer Landes, laut Gründungsmythos verschuldet durch einen Mord (siehe Kasten S. 88). Der Täter gründete Syrakus.

War ein geeigneter Siedlungsplatz gefunden, begann dessen Erschließung. Homer hat den Vorgang in seiner »Odyssee« knapp umrissen: Als König Nausithoos im Land Scheria – manche Forscher lokalisieren es auf der Insel Korkyra, andere auf Kreta – eine Kolonie gründete, »umgab er sie mit Mauern, baute Häuser, für die Götter Tempel und teilte die ländlichen Fluren« in gleich große Flächen für den Ackerbau. Was der Dichter in seinem Epos beschrieb, bestätigte ein Grabungsbefund in Megara Hyblaia an der Westküste Siziliens. Dort haben französische Archäologen in den 1980er Jahren mittels geomagnetischer Prospektion ein jahrtausendealtes Grabensystem im Boden entdeckt, das einst die Äcker in Parzellen unterteilte.

Gleichzeitig mit der Erschließung des Raums außerhalb der Stadt erfolgte die Ausgestaltung des durch eine Mauer abgegrenzten innerstädtischen Bereichs. Jede griechische

Die vier Phasen Magna Graecias

1 **Erste Stadtgründungen** in Italien und auf Sizilien erfolgen im 8. Jahrhundert v. Chr. ohne gezielte Planung vom griechischen Mutterland aus.

2 Das Bevölkerungswachstum in Magna Graecia führt ab etwa 600 v. Chr. zur sekundären Kolonisation im Binnenland.

3 **Große Städte** unterwerfen ab dem 5. Jahrhundert v. Chr. kleinere, insbesondere Syrakus strebt nach Vorherrschaft auf Sizilien.

4 Ab dem 3. Jahrhundert v. Chr. erweitert Rom seinen Machtbereich Richtung Süden, griechische Kolonien werden als Bundesgenossen mehr und mehr in **das wachsende Reich** integriert.

Gründungslegende von Syrakus

In seinen »Liebeserzählungen« schilderte Plutarch im 1. Jahrhundert n. Chr. sinngemäß:

Pheidon, König von Argos, suchte Korinth durch List zu unterwerfen, wurde aber von Habron verraten. Aus Furcht vor Verfolgung zog dieser in das Dorf Melissos nahe Korinth. Dort zeugte er einen Sohn, den er nach seiner neuen Heimat benannte. Dem Melissos wurde Jahre später seinerseits ein Sohn geboren, der schöne und von allen geliebte Aktaion. Diesen begehrte auch Archias, einer der reichsten und mächtigsten Männer Korinths. Da sein Werben erfolglos blieb, wollte er den Jüngling rauben.

Begleitet von Freunden und Sklaven zog er zum Haus des Melissos, der sich jedoch, seinerseits von seinen Freunden und Nachbarn unterstützt, zur Wehr setzte. Bei diesen Kämpfen kam Aktaion jedoch zu Tode. Melissos zog mit dem Leichnam auf die Agora von Korinth und forderte Rache. Die Bürger bezeugten zwar ihr Mitleid, unternahmen aber nichts, die Bluttat zu sühnen. Daraufhin wandte sich Melissos an den Gott Poseidon und unterstrich seine Klage durch den Freitod.

Schon bald darauf wurde Korinth von Dürre und Seuche heimgesucht, worauf sich die Stadt an das Orakel von Delphi, an den Gott Apollo wandte. Dieser warnte vor dem Zorn des Poseidon, der nicht nachlassen würde, bis Aktaions Tod gerächt sei. Es war Archias selbst gewesen, den die Korinther nach Delphi geschickt hatten. Er kehrte erst gar nicht in seine Heimatstadt zurück, sondern fuhr nach Sizilien, wo er Syrakus gründete, zwei Töchter zeugte, – und später von seinem Gefährten und Geliebten Telephos ermordet wurde.

Apollos Orakel wurde von Siedlern befragt.

Polis verfügte zum einen über eine Agora, jenen freien Platz inmitten der Stadt, auf dem die Bürger politische Angelegenheiten diskutierten, zum anderen über Heiligtümer für die Kommunikation mit den Göttern. Hinzu kamen kommunale Bauten wie etwa das *bouleutērion*, die Tagungsstätte des Rats der Bürger; das *ekklēsiastērion*, Ort der Volksversammlung, oder das *prytaneion*, Wirkungsstätte der Ratsherren und der Ort, an dem Gesandtschaften empfangen wurden. Dort hütete man auch das heilige Feuer, das aus der Heimat mitgebracht und bei der Stadtgründung im Herd der Göttin Hestia entzündet wurde. Eine Stätte von besonderer Bedeutung war das *heroon*, Grabstätte des Gründers.

Dank der von Apollo übertragenen Autorität genoss er kultische Verehrung: »Dort, auf dem Heck der Agora, liegt er abseits, tot. Glücklich wohnte er unter den Menschen, sodann als Heros vom Volk geehrt«, sang der griechische Dichter Pindar (um 520–445 v. Chr.) in seinen Oden. Und tatsächlich stießen italienische Archäologen Anfang der 1980er Jahre auf der Agora von Poseidonia auf ein solches »Heroon«, in dem sie mehrere, sogar unversehrte »Hydrien« entdeckten, dreihenklige Vasen, die noch Reste von Trankopfern enthielten.

Die gemeinsame Kraftanstrengung beim Aufbau einer neuen Existenz, das tägliche Aufeinander-angewiesen-Sein in fremder Umgebung stärkten das Zusammengehörigkeitsgefühl der Siedler. Die Mauer, die jede Siedlung nach außen abgrenzte, signalisierte auch Einheit nach innen. Im Tempel der Stadtgottheit erwies sich die Apoikie als Kult-, durch das Wappen auf den städtischen Münzen zudem als Wirtschaftsgemeinschaft. Das kommunale Bewusstsein war bei den Bewohnern der Magna Graecia besonders stark ausgeprägt. Nach Ansicht des Mannheimer Althistorikers Kai Brodersen entwickelte sich eine regelrechte Siedleridentität, die gut an Ortsnamen abzulesen sei: Während etwa die europäischen Auswanderer der Neuzeit den Rückbezug zur Mutterstadt suchten – das heutige Manhattan beispielsweise hieß ursprünglich Neu-Amsterdam – übernahmen die Griechen zuweilen einheimische Bezeichnungen oder kreierten neue Namen (siehe Tabelle S. 87).

Zankle, das spätere Messina, war das sikelische Wort für »Sichel«, wie Thukydides zufolge den sichelförmigen Hafen beschrieb; Rhegion leitete sich von *regnunai* ab, Griechisch für »abgebrochen«, denn dort schien Sizilien von Unteritalien abgespalten. Namen waren Programm und das lautete »Unabhängigkeit vom Mutterland«. Aus Korinthern wurden Syrakuser, aus Spartanern Tarentiner und im Fall der von Bewohnern der Insel Samos 531 v. Chr. gegründeten Apoikie Dikaiarcheia, dem späteren Puteoli, war der Name gar eine direkte Erwiderung auf die politischen Verhältnisse daheim: Eine »gerechte Herrschaft« wollten die vor dem samischen Tyrannen Polykrates Geflohenen errichten.

Neues schaffen, um das Alte zu überwinden, diese Maxime lässt sich in Ansätzen auch im Bereich der Architektur erkennen: »Diese war keine simple provinzielle Variante derjenigen des Mutterlands, sondern Ausdruck eigenständigen innovativen Wirkens«, betont Dieter Mertens, Bauhistoriker am Deutschen Archäologischen Institut in Rom. Formale Eigenheiten aus Hellas vermischten sich so zu einer Art Kolonialstil, wie etwa in Megapont am Ionischen Meer, wo das Ekklesiasterion-Theater die Funktionen Versammlungs- und Schauspielstätte miteinander kombinierte, eine Innovation, die den Gemeinschaftsgeist zum Ausdruck brachte.

Fernab der bedrückenden Enge im Mutterland bot sich ungewohnter Freiraum. Keine Agora in Hellas hätte Platz für ein Versammlungsgebäude geboten, das gut und gern achttausend Personen fassen konnte, in Megapont war dies möglich. Mitte des 6. Jahrhunderts v. Chr., Athen wurde noch von Tyrannen regiert und auf der Akropolis stand noch kein Parthenon, errichtete die Stadt Poseidonia dem Meeresgott einen Sakralbau, dem Hellas an Monumentalität und Erhabenheit nichts entgegenzusetzen hatte.

Griechische Apoikien waren souveräne Gemeinwesen, die lediglich »Pietätsbeziehungen zur Mutterstadt« unterhielten, wie Adam Smith (1723–1790) befand, einer der Gründerväter der Vereinigten Staaten von Amerika. Von ganz entscheidender Bedeutung, so der Münchner Althistoriker Jakob Seibert, sei die räumliche Entfernung der Kolonie zur Mutterstadt gewesen. Dementsprechend war die Eigenständigkeit Magna Graecias im Vergleich zu den Pflanzstädten an der kleinasiatischen Küste deutlich ausgeprägter. Allenfalls ein Gefühl kultureller Zugehörigkeit zum Heimatland manifestierte sich in Sprache, Kunst, Literatur, Religion und Lebensweise.

Am deutlichsten brachten dies Schatzhäuser und Weihgeschenke in Heiligtümern wie Delphi zum Ausdruck, mit denen die Kolonisten freilich der griechischen Welt demonstrierten: Wir haben es geschafft! Eine weitere Gelegenheit, den gemeinsamen kulturellen Hintergrund zu betonen und gleichzeitig in Wettstreit mit dem Mutterland zu treten, bot sich bei den olympischen Spielen. Milon, der wohl erfolgreichste Olympionike der Antike, trat dort explizit als Bürger seiner Heimatstadt Kroton auf.

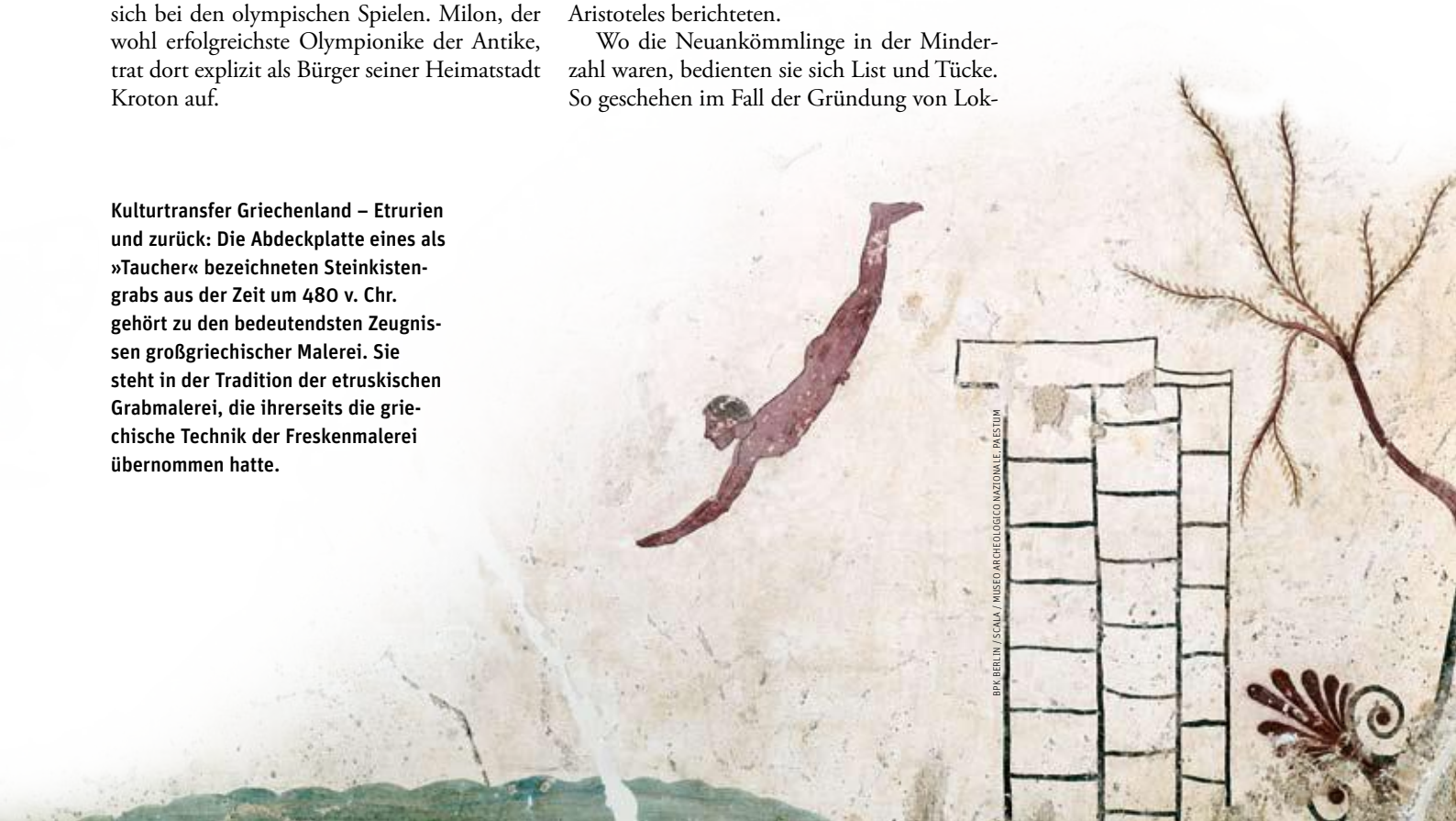
Solches Selbstvertrauen basierte keineswegs nur auf dem Bewusstsein, den Boden urbar gemacht und in der Fremde überlebt zu haben. Koloniegründung und -entwicklung verliefen selten friedlich, denn die Griechen in Unteritalien und auf Sizilien betraten Mitte des 8. Jahrhunderts v. Chr. ja keinen menschenleeren Raum. Auf Sizilien lebten Völker wie die Elymer, Sikaner und Opiker, in Unteritalien die Oinotrier, Sikuler und Iapygier. Beschäftigten sich Forscher bis vor etwa zehn Jahren noch vor allem mit der Chronologie der Großen Griechischen Kolonisation und den Motiven der Siedler, konzentrieren sie sich inzwischen vor allem auf den Zusammenprall der Kulturen und den dadurch ausgelösten Wandel in Magna Graecia.

Archäologische Grabungen beweisen, dass die Mehrzahl der Pflanzstädte auf den Trümmern bestehender Orte errichtet wurde. Völkerverständigung gab es wohl nur selten, etwa in Megara Hyblaia, benannt nach dem einheimischen Sikulerkönig Hyblon, der den Siedlern aus Megara gestattete, sich auf seinem Gebiet niederzulassen. Meist aber erfolgte die Landnahme mit Gewalt. Die aus Sparta stammenden Gründer von Taras – Spartas einzige Apoikie – lieferten sich mit den Iapygiern über Jahre hinweg erbitterte Kämpfe. Zu einem Dialog der Kulturen kam es auch bei der Gründung von Syrakus nicht. Dort zerstörten die Korinther vielmehr gleich nach ihrer Ankunft die sikulische Siedlung auf der Insel Ortygia; wer blieb, musste den Status des Hörigen akzeptieren, wie Herodot und Aristoteles berichteten.

Wo die Neuankömmlinge in der Minderzahl waren, bedienten sie sich List und Tücke. So geschehen im Fall der Gründung von Lok-

MUSEO ARCHEOLOGICO NAZIONALE, NEAPEL

Wein, Weib und Gesang gehörten zu einem echten »Symposium«, einem Trinkgelage griechischer Männer. Musikerinnen, hier eine Aulos-Spielerin, waren meist auch Prostituierte. Diese Szene ziert einen Krater, also ein Gefäß zum Mischen von Wein und Wasser. Der in Kyme gefunde Krater war als rotfigurige Vasenmalerei ausgeführt, einer qualitätvollen griechischen Keramiktechnik.



BPK BERLIN / SCALA / MUSEO ARCHEOLOGICO NAZIONALE, PAESTUM

Kulturtransfer Griechenland – Etrurien und zurück: Die Abdeckplatte eines als »Taucher« bezeichneten Steinkistengrabs aus der Zeit um 480 v. Chr. gehört zu den bedeutendsten Zeugnissen großgriechischer Malerei. Sie steht in der Tradition der etruskischen Grabmalerei, die ihrerseits die griechische Technik der Freskenmalerei übernommen hatte.

MUSEO ARCHEOLOGICO REGIONALE, PALERMO

Der Heroe Perseus schlich sich mit Hilfe der Göttin Athene in die Höhle der schlafenden Medusa und schlug dieser den Verderben bringenden Kopf ab. Im Augenblick ihres Todes gebar Medusa das geflügelte Pferd Pegasos, das Perseus zu seinem nächsten Abenteuer trug. Das um 540 v. Chr. entstandene Relief zierte die Ostfront eines Tempels in Selinunt auf Sizilien.

roi Epizephyrioi, nahe dem heutigen Locri in Kalabrien. Dem Historiker Polybios zufolge schworen die Siedler den Sikulern Freundschaft, »solange ihr Fuß die Erde beträte und sie den Kopf auf den Schultern trügen«. Doch vor dem Eid hätten sie Erde auf die Sohlen ihrer Schuhe gestreut und Knoblauchköpfe unter ihren Gewändern auf die Schultern gelegt. Die formalen Bedingungen des Schwurs waren also rasch beseitigt und die Sikuler wurden alsbald vertrieben.

Für böses Blut sorgte auch, dass die ersten Siedler, meist junge Männer, ohne Frauen kamen. Denn in Hellas herrschte vor allem Mädchenmangel. Weil die patriarchalische Gesellschaft männliche Nachkommen bevorzugte, Mädchen zudem teuer wurden, weil schon zu Lebzeiten der Eltern ihr Erbteil als Mitgift fällig war, wurden weibliche Neugeboren häufig in freier Natur ausgesetzt. Auch die gleichberechtigte Erbteilung unter den Söhnen motivierte zur Auswanderung, da längst viele Landgüter zu klein geworden waren, um Familien zu ernähren. »So ergab sich ein Überschuss an jungen Männern«, konstatiert Kai Brodersen, »die in der Fremde wohl zu Recht mehr Chancen für sich sahen als in der Heimat.« Diese Singles nahmen sich nun einheimische Frauen, und zwar meist mit Gewalt – in der Antike nicht unüblich: Römer raubten die Sabinerinnen, die Karthager versorgten sich an Afrikas Küste und vom kleinasiatischen Milet überlieferte Herodot »Die Ionier brachten keine Frauen mit in ihre Neusiedlung, sondern nahmen karische Mädchen, deren Eltern sie zuvor erschlagen hatten.«

Dass die Kolonisation Italiens und Siziliens dennoch gelang, muss jedoch nicht verwundern. Es gab keine zentralisierten und mächtigen Staatsgebilde, das Land war dünn besiedelt. Dementsprechend blieb der Widerstand lokal und begrenzt.

Einige Generationen später waren die Wunden verheilt und man hatte sich arrangiert, wie der römische Historiker Iustin schrieb: »Die Griechen haben die Einheimischen daran gewöhnt, nach Gesetzen und nicht bloß mit Waffengewalt zu leben, auch Reben zu beschneiden und Ölbäume anzupflanzen.« Aus Italikern wurden Griechen. Grabbeigaben an Kultplätzen der Urbevölkerung wie etwa Salbengefäße, Kratere und Disken lassen darauf schließen, dass der Lebensstil der Hellenen Anklang gefunden hatte. Man lag entspannt beim Bankett oder maß seine Kräfte im sportlichen Wettkampf. Die Etrusker übernahmen die Sitte des gemeinschaftlichen Badens, von ihnen lernten es dann die Römer. Vom Nutzen der Münzprägung ließen sich die einheimischen Fürsten schnell überzeugen und wer von Stand war, demonstrierte dies durch Feinsinn: Griechische Künstler verbreiteten den Bronzeguss von Skulpturen und die Fertigkeiten der Vasenmalerei. Deren Substrat, die dünnwandige Keramik, wurde dank der griechischen Töpferscheibe bald als Massenware hergestellt.

BPK BERLIN / SCALA

Mitten in Syrakus stand der große Tempel der Göttin Athena, vermutlich im Auftrag des Tyrannen Gelon errichtet, ein Dank für seinen Sieg über ein karthagisches Invasionsheer 488 v. Chr. Von einem raffgierigen römischen Statthalter im 1. Jahrhundert v. Chr. des wertvollsten Schmucks beraubt, wurden Säulen und andere Bauteile des Heiligtums im Mittelalter in den Dom von Syrakus integriert.

Die Großen fressen die Kleinen

Doch schon im 6. Jahrhundert v. Chr. holten die alten Probleme die Kolonisten wieder ein. Stetiger Zustrom von Nachzüglern, vom Dichter Archilochos (um 680–645 v. Chr.) als »Abschaum der Menschheit« bezeichnet, führte zu Spannungen, denn die alteingesessenen Familien billigten ihnen politisch wie ökonomisch weniger Rechte zu. Sogleich brach denn auch die »alte Krankheit der Griechen« wieder auf, »ihre heillose Zerstrittenheit«, wie Platon sich ausdrückte. Die Apoikien Unteritaliens gründeten nun ihrerseits Kolonien, um den sozialen Druck abzulassen: Sybaris gründete um 600 v. Chr. Poseidonia, Kyme um 500 v. Chr. Neapel. Zudem okkupierte man Ackerland von benachbarten Gemeinden. So wurde das reiche Siris bald von seinen Nachbarn Kroton, Sybaris und Megapont zerstört. 510 v. Chr. schluckte Kroton dann Sybaris.

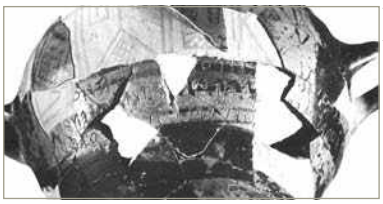
Zwei Jahrhunderte später schlossen sich die einheimischen Völker Süditaliens, Osker, Samniten, Lukaner und Bruttier, zu Stammesverbänden zusammen. Der Druck auf die Griechenstädte wuchs und sie gingen eine Notgemeinschaft ein, den »archaischen Städtebund«. Als auch der nicht genügend Gewicht auf die Waagschale der Macht brachte, riefen sie Fremde zu Hilfe, wie etwa den Molosserkönig Alexander. Das jedoch missfiel dem aufstrebenden Rom, das seit dem 4. Jahrhundert v. Chr. seine Macht immer weiter nach Süden ausdehnte. Nachdem es in einem verlustreichen Krieg (343–290 v. Chr.) die Samniten bezwungen hatte, empfahl es sich den Griechenstädten als Schutzmacht gegen die Lukaner, Bruttier und Osker. In Wahrheit freilich ging es um Expansion. Immer mehr gerieten die griechischen Poleis in den römischen Machtbereich: Mitte der 80er Jahre des

3. Jahrhunderts v. Chr. trat das schwer bedrängte Thurioi am Golf von Tarent einem Bund mit der Tiberstadt bei; Locroi, Rhegion und Kroton schlossen sich bald darauf an. Sie erhielten römische Garnisonen und den Status von Verbündeten. Lediglich Tarent, die reichste und mächtigste Griechenstadt des italischen Festlands, stellte sich offen gegen Rom, versenkte dessen Schiffe und vertrieb die Legionäre aus Thurioi. Zur Unterstützung versicherte man sich der Truppen des Söldnerkönigs Pyrrhus von Epirus, doch der zog sich nach schwer erkämpften »Pyrrhus-Siegen« 275 v. Chr. aus Italien zurück. Drei Jahre später musste sich auch Tarent als letzte freie Griechenstadt Rom unterwerfen.

Der griechischen Kultur schadete das allerdings nicht. Roms Poet Horaz dichtete: »Das mit dem Schwert eroberte Griechenland eroberte den rohen Sieger mit seinem Geist, denn es brachte die Künste und Wissenschaften ins bäuerische Latium.« In der Tat: Römische Dichtung, Philosophie und Wissenschaft nahmen ihren Anfang mit der Übersetzung oder Bearbeitung griechischer Werke.

Der Begründer der römischen Literatur, Livius Andronicus (um 284–204 v. Chr.) war ein Kriegsgefangener aus Tarent; neben Dramen und Tragödien übertrug er die »Odyssee« ins Lateinische. Plautus (um 254–184 v. Chr.) und Terenz (um 190–159 v. Chr.) folgten der zeitgenössischen griechischen Komödie. Cicero wandelte auf Platons Spuren, seine Schriften »Über den Staat« und »Über die Gesetze« orientierten sich an dessen Werken. Die erste Darstellung der römischen Geschichte unternahm ein gewisser Quintus Fabius Pictor um 200 v. Chr. – in griechischer Sprache, denn er wollte Rom der Welt vorstellen und die sprach noch nicht Latein. Den mythischen Anschluss an die griechische Welt stifteten wieder die Dichter. Sie gaben Romulus, dem Stadtgründer, den Troianer Aeneas zum Ahnherrn. Wie Odysseus irrte dieser nach dem Fall Troias jahrelang über die Meere, bis er in Italien eine neue Heimat fand.

Selten hat ein historischer Prozess eine so nachhaltige Wirkung entfaltet wie die im 8. Jahrhundert v. Chr. einsetzende Migration der Griechen. Man denke nur an die weiträumige Verbreitung des Alphabets und der urbanen Zivilisation, aber auch an die politischen Institutionen der Stadtstaaten. Und so paradox es klingen mag: In der »politischen Hülle des Römischen Reiches«, so der deutsche Althistoriker Alfred Heuss (1909–1995), »gelangte die griechische Zivilisation zu globaler Entfaltung und wurde somit zum Wegbereiter der abendländischen Kultur«. ◁



MUSEO ARCHEOLOGICO, PITHECUSA (ISCHIA)

»Wer aber aus unserem Becher trinkt, den wird sogleich das Liebesverlangen nach der schön bekränzten Aphrodite ergreifen«

Diese Zeilen eines unbekannten Künstlers auf dem so genannten Nestorbecher aus Pithekussai (730–720 v. Chr.) gehören zu den ältesten überhaupt bekannten Beispielen griechischer Schrift.

Theodor Kissel ist Althistoriker in Mainz.

Literaturtipp

Die Griechen in Süditalien. Von Luca Cerchiali, Lorena Jannelli und Fausto Longo. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart 2004

KALENDER
HIMMEL UND ERDE 2008

Im Kalender Himmel und Erde 2008 präsentieren Hobbyastronomen ihre schönsten Großformataufnahmen. 14 Seiten , 55 x 45,5 cm, € 29,95 zzgl. Porto.

DER HIMMEL 2008

Der Himmel 2008 ist mit umfangreichem Kartenmaterial ausgestattet und vor allem auf die praktischen Aspekte der Himmelsbeobachtung ausgerichtet; € 12,95 (zzgl. Versand).

AHNERT 2008

Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2008 ist der ideale Begleiter für alle Sternfreunde, die Wert auf ein reichhaltiges astronomisches Hintergrundwissen legen; € 9,80 (zzgl. Versand).

Bestellen können Sie unter
www.spektrum.com/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Die Kunst, den Zweifel auszuhalten

Erst seit Kurzem verstehen Forscher, warum Menschen so leichtgläubig sind. Zu Zweifeln fällt ihnen schwer, umso mehr suchen sie nach Gewissheit. Unser Autor sieht darin die Ursache dafür, dass der Glaube oft missbraucht wird.

Von Martin Urban

Der amerikanische Physiknobelpreisträger Richard P. Feynman, schrieb einmal: »In der Physik tritt die Wahrheit nur selten vollkommen klar zu Tage – vermutlich gilt das generell für alles menschliche Denken.« Konsequenz: »Folglich kann, was nicht mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist, unmöglich die Wahrheit sein.« Papst Benedikt XVI. sagte im September 2007 in Österreich, die »Resignation der Wahrheit gegenüber« sei der Kern der Krise Europas.

Was ist Wahrheit? Das soll einst schon Pontius Pilatus gefragt haben, bevor er seine Hände in Unschuld wusch. Die ganze Wahrheit kennen nur fromme Fundamentalisten, zum Beispiel im Vatikan – freilich ist das auch nur ihre Wahrheit. Vor dreihundert Jahren hat Galileo Galilei gewagt, das damals schon zweitausend Jahre alte Weltbild in Frage zu stellen. Im Unterschied zu den Intellektuellen seiner Zeit fragte er nicht, was wohl Plato und Aristoteles sich gedacht haben mögen, und wie das zu verstehen sei. Vielmehr befragte er die Natur.

Seine Beobachtungen, vor allem mit seinen selbst gebauten Fernrohren, waren umwerfend. Gebirge auf dem Mond und Flecken auf der Sonne bewiesen ihm, dass der Himmel, anders als Aristoteles behauptet hatte, nicht »vollkommen« ist. Und, aufregender noch, sie zeigten ihm, dass Nikolaus Kopernikus Recht hatte mit seiner These, wonach nicht die Erde, sondern die Sonne im Mittelpunkt unserer Welt steht. Das konnte die katholische Kirche nicht aushalten. Am 22. Juni 1633 wurde Galilei als Ketzer dazu verurteilt, seine Erkenntnisse zu widerrufen. Es ist erst gut 15 Jahre her, dass der Gelehrte offiziell rehabilitiert wurde.

Für Wissenschaftler ist es selbstverständlich, sich und die eigenen Behauptungen immer wieder in Frage zu stellen. Auch der Glaube muss, meine ich, immer wieder neu bedacht werden, damit er nicht zum Aberglauben wird. Die Erkenntnis, dass man mit Hilfe ausgeklügelter Experimente und kluger Beobachtungen Aberglauben als solchen identifizieren kann, hat sich freilich noch nicht bis nach Rom herumgesprochen. Schlimmer noch, nicht nur dort, sondern in allen christlichen Glaubensgemeinschaften setzen sich zunehmend die Fundamentalisten durch, jene Menschen also, die fraglos glauben.

Menschen wünschen sich einfache Erklärungen und sind deshalb für Ideologien offen, die ihnen die Welt ganz schlicht erklären.

Die Bibel im Biologieunterricht

Die fundamentale Erkenntnis einer Evolution des Kosmos und des Lebens als Ergebnis von Zufall und Notwendigkeit ist offenbar für Benedikt XVI. unerträglich. »Wir sind nicht das zufällige und sinnlose Produkt der Evolution. Jeder von uns ist die Frucht eines Gedankens Gottes.« So sagte es der Papst bei seiner Amtseinführung. Christliche Fundamentalisten aller Konfessionen nehmen die Schöpfungsgeschichte der Bibel wörtlich. Und sie finden mittlerweile auch in Deutschland Gehör, sogar bei Politikern. So schlug die hessische Kultusministerin, eine gelernte evangelische Religionslehrerin, im letzten Jahr vor, eine auf die Bibel bezogene »Schöpfungslehre« in den Biologieunterricht einzubauen. Warum nicht auch die Märchen der Gebrüder Grimm? Hier finden sich ebenfalls in einzigartigen Bildern menschliche Erfahrungen bis zurück in die Steinzeit beschrieben.

Erst in jüngster Zeit können Naturwissenschaftler erklären, warum Menschen so leicht Unsinn glauben. Der Mensch ist zwar fähig, sich die Welt zu deuten. Aber er hat keinen Sinn für den Zufall, und es fällt ihm schwer, die Ungewissheit auszuhalten. Denn er sucht nach Gewissheit. Das macht ihn anfällig für Überlistung seines Verstands und den Miss-

brauch seines Glaubens. In einer unsicheren Welt suchen die Menschen Sicherheit, wünschen sich einfache Erklärungen, und deshalb sind sie für Ideologien offen, die ihnen die Welt ganz schlicht erklären. Aberglaube liefert ihnen ein Mindestmaß an Gewissheit, auch da, wo tatsächlich keine zu haben ist.

Hinzu kommt, dass das biografische Gedächtnis des Menschen, also die Fähigkeit, sich zu erinnern, erst mit etwa zweieinhalb Jahren einsetzt. Wir werden leichtgläubig geboren. Ein kleines Kind glaubt, was ihm die Eltern sagen. So entsteht ein Weltbild, dessen Grundlagen als »schon immer da gewesen« verstanden und natürlicherweise nicht in Frage gestellt werden. Mit der Pubertät kommt der Zweifel auf. Er muss in richtige Bahnen gelenkt werden, damit das Kind klug wird. Denn ebenso wichtig, wie vertrauen zu können, ist es, den Zweifel auszuhalten. Wer nicht vertrauen kann, ist krank, wer nicht zweifeln kann, ist unfrei. Vertrauen gilt den Menschen, der Zweifel den Ideologien. Glücklicherweise ist der Mensch auch angeborenerweise neugierig. Er stellt sich immer wieder die Frage: Warum? Das ist die tiefere Ursache für die Bemühungen um Weltdeutung sowohl der Wissenschaftler als auch der Gläubigen. Während jedoch Wissenschaftler das »Ja, aber« als Methode für Erkenntnisfortschritt nutzen, kennen christliche Gemeinschaften nur das »Amen« in der Kirche, das keinen Widerspruch duldet.

Wer die Wahrheit weiß, seine Wahrheit, mit dem ist darüber keine Diskussion mehr möglich. Es ist sinnlos, etwa mit einem Zeugen Jehovas zu diskutieren, und es wäre ebenso unergiebig, mit dem Papst zu streiten. Fundamentalisten sind nicht diskussionsfähig. Diese haben aber immer mehr das Sagen, auch in den etablierten Kirchen. Die katholische Kirche macht den Aufbruch des 2. Vatikanischen Konzils rückgängig. Die evangelischen Kirchen vergessen das Erbe der Aufklärung und öffnen sich mehr und mehr den Evangelikalen. Zwar stellt zum Beispiel die Evangelische Landeskirche in Württemberg in einem Manifest vom Juli 2007 richtig fest: »Der protestantische Fundamentalismus liefert der aufgeklärten Religionskritik eher die Argumente, als dass er diese entkräftet.« Und weiß zwar: »Der Wille Gottes geschieht in der Welt durch die natürlichen Zusammenhänge von Ursache und Wirkung.« (Dabei dürfte es der Landeskirche allerdings schwerfallen zu erklären, was denn »der Wille Gottes« sei.) Aber entscheidend ist die Schlussfolgerung, sozusagen der fromme Pferdefuß: »Der Kreationismus soll aus der Evangelischen Kirche nicht durch Abgrenzung verdrängt, sondern er soll argumentativ und durch Vertiefung des Glaubens überwunden werden.«

Was das wohl heißt? Glaubensstärke oder Glaubenstiefe ist ja kein Wert an sich. Es kommt darauf an, was der Mensch glaubt. Insofern ist das Rezept der evangelischen Kirche unsinnig. Alle Glaubensgemeinschaften, das ist nicht überraschend, predigen den Glauben, nicht aber den Zweifel. Mittlerweile gibt es auf der Welt allein etwa 34 000 christliche Gemeinschaften, die sich auf jeweils nur ihnen zuteilgewordene spezielle göttliche Offenbarungen berufen. Motto: Ich sehe was, was du nicht siehst. Hat sich Gott so ungenau ausgedrückt oder wird Offenbarung nur gründlich missverstanden?

Erbe aus der Steinzeit

Ein Witz drückt den »systemimmanenten« Glauben so aus: Ein frommer Jude trifft einen Skeptiker. Der Fromme: »Wie kannst du es wagen, über einen Rabbi zu lachen, dem sich Gott selbst jeden Freitagabend offenbart?« – Der Skeptiker: »Woher weißt du das?« – Der Fromme: »Er hat es mir selbst erzählt.« – Der Skeptiker: »Vielleicht hat er gelogen.« – Der Fromme: »Was fällt dir ein! Wird denn ein Mensch lügen, dem Gott sich offenbart?«

Die Vorstellung einer Offenbarung ist ein Erbe aus der Altsteinzeit. Damals machten die Schamanen die Erfahrung, mit Hilfe von Drogen, durch Tanz und Musik »außer sich« sein zu können; eine Erfahrung, die heute die Kids bereits bei einem Popkonzert machen können, denn so funktioniert nun mal das menschliche Gehirn. Die Schamanen aber meinten wie heute noch die fundamentalistischen Gläubigen, in der Ekstase dem Mund Gottes besonders nahe zu sein und dabei genau zu erfahren, was der göttliche Wille ist. »Gott möchte, dass ich Präsident werde«, verkündete zum Beispiel George W. Bush vor

Wer die Wahrheit weiß, mit dem ist keine Diskussion darüber möglich

Jenseits der Sinneswahrnehmung gibt es weder Offenbarung noch irgendwelche Sonderwahrnehmungen

seiner Wahl. Und selbstverständlich war es auch Gottes Wille, dass der US-Präsident in den Irak einmarschieren ließ. So wie es Gottes beziehungsweise Allahs Wille war, dass Osama bin Laden die USA angreifen musste.

»Offenbarung« ist ein Totschlagargument, mit dem jeder Glaube, aber auch jeder Unsinn begründet werden kann. Das dem zu Grunde liegende uralte Selbstbildnis, wonach der Mensch nicht nur ein Teil der Natur ist, sondern auch mit einer anderen, geistigen Welt kommunizieren kann, steht im Widerspruch zu fundamentalen Erkenntnissen der Naturwissenschaftler. Denn wie sollte eine nichtmaterielle, geistige Entität die materiellen Prozesse in unserem Gehirn beeinflussen? »Jenseits dessen, was Menschen mit ihren Sinnen wahrnehmen können, gibt es weder Offenbarung noch irgendwelche Sonderwahrnehmungen.« Das sagt der protestantische Theologe Klaus-Peter Jörns.

Hang zum Anti-Intellektualismus

Spätestens seit Immanuel Kants Kritik wissen auch Theologen, dass es weder einen Gottesbeweis noch einen Gegenbeweis geben kann, weshalb auch der Atheismus nur eine Ideologie ist. Das Bild eines Gottes, wie es Jesus den Menschen vermittelt hat, ist dennoch so attraktiv, dass seither Christen darauf im Leben und Sterben bauen. Und dies, obwohl bereits die Verfasser der Schriften des Alten wie die des Neuen Testaments jeweils ihre eigene Theologie in Dichtung und Wahrheit ausschmücken. Es bleibt die Aufgabe der Theologen, sich – im Licht der Erkenntnisse auch jeweils anderer Wissenschaften – damit kritisch auseinanderzusetzen.

Doch die christlichen Kirchen hören nicht auf ihre eigenen Wissenschaftler. Sie verschweigen die Erkenntnisse der historisch-kritischen Theologie. Die der Naturwissenschaften kennen sie ohnedies kaum. Sie halten die Bilder, die sie sich von der Wirklichkeit machen und die sie seit zweitausend Jahren immer feiner ausspinnen, für die Wirklichkeit. Andernfalls gäbe es im Vatikan keinen unfehlbaren Papst und das System bräche zusammen. Doch auch in den protestantischen Kirchen gibt es »einen fatalen Hang zum Anti-Intellektualismus«, urteilt der evangelische Theologe Friedrich-Wilhelm Graf. Er hilft aber nicht, den Rückzugsprozess aufzuhalten: Die Intellektuellen gehen ohnedies nicht mehr hin, und die Frommen werden Beute der Fundamentalisten innerhalb und außerhalb der Kirchen. Die Pfarrer in den (außer am Heiligabend) vielerorts gähnend leeren Gotteshäusern predigen zwar guten Willens, aber zumeist wider besseres Wissen. Und sie halten dennoch, wie der Ratsvorsitzende der Evangelischen Kirche in Deutschland Wolfgang Huber, den Gottesdienst für ihr »Kerngeschäft«. Kerngeschäft ist aber etwas für Nussknacker. Daraus wird dann wie in der Süßwarenindustrie Marzipan gemacht; eine bittersüße Angelegenheit.

Wie kommt es zu diesem Auseinanderfallen von Glauben und Wissen? Denken ist, anders als Glauben, schon biologisch eine anstrengende Angelegenheit. Pro Gewichtseinheit setzt die Hirnmasse 16-mal so viel Energie um wie das Muskelgewebe. Natürlicherweise beschränkt sich unser abwägendes Denken, anders als das Fühlen, daher auf das Allernotwendigste. Denn das dafür zuständige so genannte Arbeitsgedächtnis ist in seiner Kapazität beschränkt. Wo immer es geht, arbeitet der Kopf Energie sparend und automatisch. Das, was schon immer so war, anzuzweifeln, setzt starke Emotionen voraus, möglichst positive. Unseren Kinderglauben zweifelnd zu bedenken ist jedoch im Allgemeinen alles andere als lustvoll – passiert also nicht automatisch. Der Dichter Gotthold Ephraim Lessing vermerkte: »Der Aberglaub', in dem wir aufgewachsen, verliert, auch wenn wir ihn erkennen, darum doch seine Macht nicht über uns.«

Offensichtlich ist es auch für Intellektuelle einfacher, in zwei Welten zu leben: in dieser des Wissens und jener des Glaubens, der ein Kinderglaube geblieben ist und deshalb nicht reflektiert wird. Andererseits sind viele Menschen auf der Suche nach etwas, was ihrem Leben Sinn gibt. Denn es ist eine der großartigen Möglichkeiten des Menschen, seinem Leben Sinn geben zu können. Homo sapiens hat sich während seiner Evolution entwickelt, um zu überleben, was ihm trotz aller Katastrophen der Erdgeschichte offensichtlich gelungen ist, anders als etwa den Sauriern.

Die Welt verstehen zu wollen und einen Sinn darin zu suchen, kurz, nach dem Warum zu fragen, ist gewissermaßen ein Nebeneffekt dieser Entwicklung. Ergebnis der Notwendigkeit, sich orientieren zu müssen, obgleich die eigenen Sinnesorgane eher schwach entwickelt sind, im Gegensatz zu denen etwa der Raubtiere. Nur muss der Mensch damit leben, nicht auf alle seine Fragen Antworten zu finden. Die Wahrheit wird er nie erfahren. Neben dem Zweifel allen Ideologien gegenüber, die die Wahrheit zu wissen vorgeben, bleibt ihm die Hoffnung, die zu einer persönlichen Gewissheit werden kann. Auch das lässt sich in einem Witz ausdrücken:

Zu einem Sterbenden kommt der Pfarrer und sagt: »Ich bin gekommen, um Ihnen das Wort Gottes zu verkünden.« – Der Todkranke: »Wozu brauche ich da Sie? Ich werde doch gleich mit Ihrem Chef persönlich sprechen.« ◁

GEORG PFREIMER, MIT FRDL. GEN. DES EICHBORN VERLAGS

Der Physiker und Wissenschaftspublizist **Martin Urban** leitete 34 Jahre lang die Wissenschaftsredaktion der »Süddeutschen Zeitung«. In seinen Büchern geht er den Konsequenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisse für unser Weltbild nach. Zuletzt erschien von ihm: »Wer leichter glaubt, wird schwerer klug. Wie man das Zweifeln lernen und den Glauben bewahren kann« (Eichborn Verlag, September 2007).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912788.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CHRISTOPH PÖPPE

KINEMATIK

Monumentale Kaleidozyklen

Ringe aus Tetraedern, die entlang von Kanten verbunden sind, können faszinierende Umstülpbewegungen ausführen.

Von Christoph Pöppe

Es sieht fast so aus, als würde eine ins Monströse vergrößerte Nachteule mit majestätischer Langsamkeit ihre Flügel schlagen. Nur gelegentlich durchbricht ein beängstigendes Knacken die Stille und erinnert den Betrachter daran, dass hier beträchtliche Massen bewegt werden. Was seit wenigen Wochen von der Decke des Mathematikums (des »mathematischen Mitmach-Museums«) in Gießen hängt, ist ein Gelenkmechanismus aus sechs starren Bestandteilen, die miteinander durch Scharniergelenke zum Ring verbunden sind. Es handelt sich um Tetraeder, also Körper, die von vier Dreiecken begrenzt sind und deren je drei an eine der vier Ecken grenzen.

Irgendwie rotiert der Ring, aber nicht auf die nahe liegende Weise. Er stülpt sich vielmehr permanent um: Was auf der Innenseite des Rings lag, gerät nach oben, nach außen, nach unten und wieder nach innen. Dem Blick von unten bietet sich ein Sechseck, von dem jede zweite Ecke nach innen wandert, bis von Inneren nur noch ein in der Mitte etwas dicklicher Mercedesstern übrig bleibt. Im weiteren Verlauf der Bewegung wird das Sechseck wiederhergestellt, und die bisher äußeren Ecken machen sich auf die Einwärtswanderung.

Denken Sie bei dem Wort »Tetraeder« nicht allzu intensiv an den gleichnamigen platonischen Körper. Die Glieder dieser Kette sind keine regelmäßigen Tetraeder. Ihre Kanten sind nicht gleich lang; wenn sie es wären, könnten sechs von ihnen sich nicht zu einem Ring schließen.

Beweglich dank Symmetrie

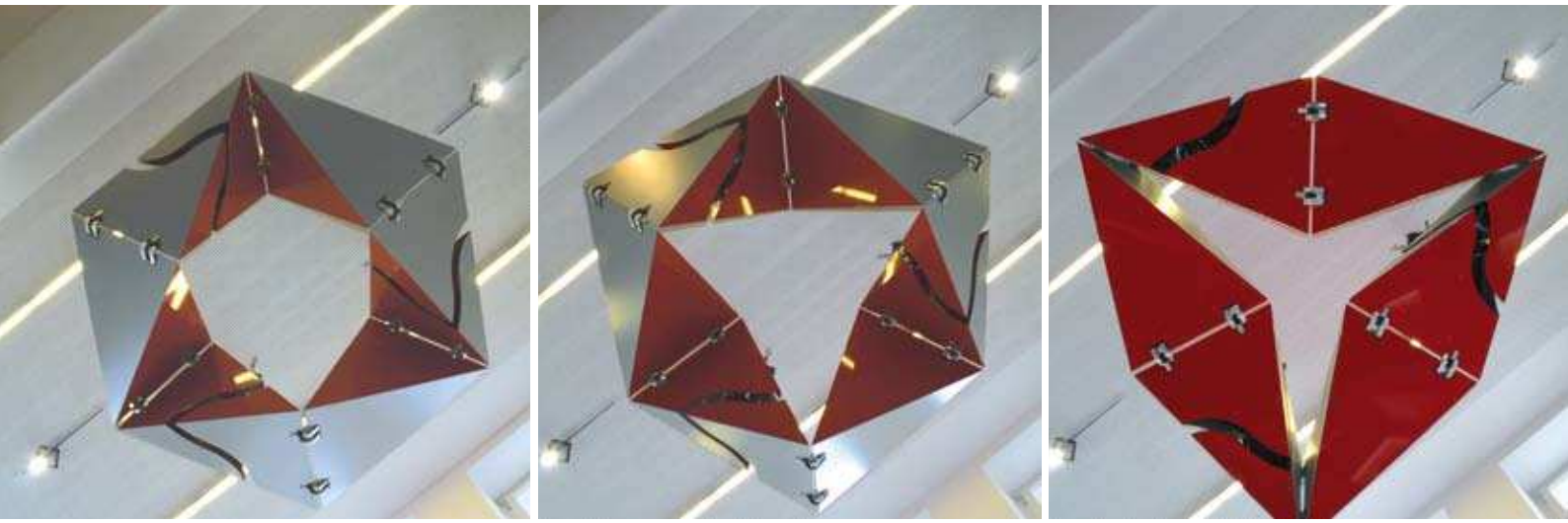
Für alle Tetraeder, regelmäßig oder nicht, gilt jedoch: Jeder Kante liegt genau eine weitere Kante gegenüber, die mit ihr keine Berührung hat. Beim regelmäßigen Tetraeder stehen gegenüberliegende Kanten senkrecht aufeinander. Das klingt für Strecken, die keinen Punkt gemeinsam haben, etwas merkwürdig, heißt aber nichts weiter, als dass sie senkrecht aufeinander stehen, wenn man eine der beiden Kanten durch Parallelverschiebung in Kontakt zur anderen bringt – irgendwie.

In jedem Tetraeder des Gelenkmechanismus liegen die beiden Kanten, die mit den Nachbartetraedern verbunden sind, einander gegenüber und stehen senkrecht aufeinander. Damit stehen die sechs Drehachsen der Scharniergelenke ziemlich wild herum. Während der Umstülpung bleiben sie nicht unverändert, sondern rotieren selbst im Raum. Konsequenterweise ist die gesamte Mechanik nicht etwa an den Scharniergelenken aufgehängt, sondern an den einzigen Punkten, die wirklich ortsfest bleiben: den Mittelpunkten der Tetraeder.

Welche komplizierten Berechnungen sind erforderlich, um die richtigen Abmessungen für die Ringglieder zu finden, sodass der ganze Ring auf so wundersame Weise beweglich bleibt, ohne irgendwo zu klemmen? Die überraschende Antwort ist: nicht viele. Es funktioniert mit einer großen Vielfalt an Tetraederformen. Es gibt nur eine einzige echte Einschränkung. Der Abstand zwischen den Scharnierkanten darf nicht zu kurz sein; sonst schrumpft der Mercedesstern nicht nur auf nichts zusammen, sondern möchte sich »überschlagen«, und das geht natürlich nicht.

Marcus Engel hat die zugehörige Geometrie auf seiner Website www.kaleidocycles.de in aller wünschenswerten Ausführlichkeit bis hin zu expliziten Formeln durchgerechnet. Da lässt sich die massenhafte Anwendung von Winkelfunktionen nicht vermeiden. Aber das Prinzip hinter seiner Herleitung ist auch ohne sie erklärbar.

Wir vereinfachen uns zuerst die Situation, indem wir ihre Symmetrie nutzen. Es stellt sich heraus, dass die Drehachsen der Scharniere zwar nicht ortsfest sind, aber jeweils in einer Ebene bleiben. Wenn der Ring, wie bei der Installation in Gießen, insgesamt horizontal orientiert ist, stehen diese Ebenen sämtlich



Der Riesen-Kaleidozyklus im Gießener Mathematikum wird getrieben durch Motoren im Inneren der Teiltetraeder. Im Verlauf einer Umstülpung zeigt es dem Betrachter von unten immer abwechselnd eine rote und eine graue Seite.

vertikal und sind darüber hinaus noch Symmetrieebenen. Wenn man sie in Gedanken durch Spiegel ersetzt, kann man – in Gedanken! – fünf der sechs Tetraeder weglassen. Das letzte Tetraeder mitsamt seinen Spiegelbildern bietet dann denselben Anblick wie zuvor.

Es genügt sogar, über die zwei Spiegel nachzudenken, die unser letztes verbliebenes Tetraeder einrahmen. Sie stehen zueinander im Winkel von 60 Grad, und das Tetraeder muss sich so bewegen, dass jede seiner beiden Scharnierkanten stets in ihrer Spiegelebene liegt.

Kann unter dieser Bedingung eine Scharnierkante eine vollständige Drehung in ihrer Ebene ausführen (und die andere dann auch)? Die Antwort ist ja. Wohlgemerkt: »Vollständige Drehung« heißt nicht um einen festen Punkt. Vielmehr muss es genügen, wenn die Kante jede mögliche Orientierung in ihrer Ebene einnehmen kann.

Und das sieht man so: Wir lassen der Übersichtlichkeit zuliebe das Tetraeder abmagern – bis auf das Skelett. Dieses besteht aus den beiden einander gegenüberliegenden Scharnierkanten, nennen wir sie *a* und *c*, sowie einer Verbindungsstange namens *b* zwischen ihnen. Und zwar steht diese Stange senkrecht auf beiden Scharnierkanten. Außerdem muss nach wie vor die Bedingung erfüllt sein, dass *a* und *c* aufeinander senkrecht stehen. Aus einem Skelett ist das vollständige Tetraeder leicht wieder zu rekonstruieren, indem man die Endpunkte von *a* mit denen von *c* verbindet.

Versuchen wir nun das Skelett so zwischen die beiden Spiegel zu setzen, dass *a* und *c* jeweils einem Spiegel anliegen. Legen wir Kante *a* horizontal an den einen Spiegel und orientieren das Skelett so, dass Stange *b* ebenfalls horizontal liegt. Dann ist Kante *c* vertikal, und es ist kein Problem, das Skelett parallelzuverschieben, bis *c* dem zweiten Spiegel anliegt. Nur *b* darf nicht zu kurz sein, sonst stößt *a* beim Verschieben an die Kante, an der sich die Spiegel treffen.

Was ich soeben für den Spezialfall »*a* horizontal« beschrieben habe, funktioniert allgemein! Wir legen *a* in irgendeiner Orientierung an den ersten Spiegel. Wenn wir jetzt das Skelett um *a* als Achse rotieren, dann beschreibt das andere Ende von *b* einen Kreis und *c* alle Tangenten an diesen Kreis. Also nimmt *c* alle Orientierungen innerhalb der Ebene des Kreises an, und da diese die Ebene des zweiten Spiegels schneidet, ist unter diesen Orientierungen auch eine, die parallel zur Ebene des zweiten Spiegels liegt. Es sind sogar zwei; aber die zweite ist nicht zugänglich, weil der erste Spiegel der freien Bewegung des Skeletts im Weg steht. Durch Parallelverschiebung, welche die Orientierung von *a* nicht ändert, finden wir wieder eine Position des Skeletts, in der *a* und *c* ihren Spiegeln anliegen, was zu beweisen war.

Engel und Teufel

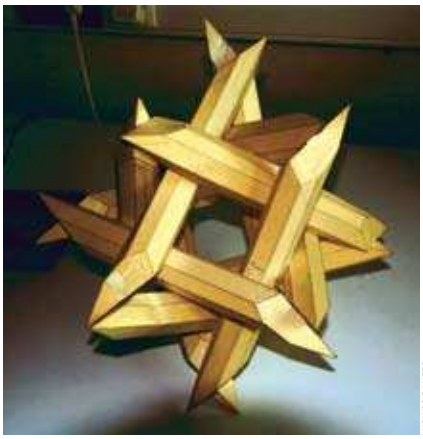
Tetraederringe dieser Art wurden einem größeren Publikum bekannt, als 1977 die Mathematikprofessorin Doris Schattschneider und der Künstler Wallace Walker die Flächen der Tetraeder mit Motiven aus Werken von M. C. Escher bedruckten und ihr Werk unter dem Namen »Kaleidozyklen« veröffentlichten (die deutsche Übersetzung erschien erstmals 1987). In der Tat sind die Tetraederringe spiegelsymmetrisch wie ein Kaleidoskop und zyklisch im Sinn von umstülpbar.

Escher hatte Flächen lückenlos und regelmäßig mit stilisierten Tieren oder auch mit Engeln und Teufeln gefüllt. Der Idee nach sind Eschers Flächen unendlich ausgedehnt. Schattschneider und Walker haben durch die Übertragung auf eine Fläche, die ein Topologe einen Torus nennen würde, aus unendlich vielen Tieren eine endliche Anzahl gemacht; aber die Fläche hat nach wie vor keinen Rand. Man muss sie sich halt über die Kanten der Tetraeder hinweg fortgesetzt denken. So kann man unendlich weit auf der Fläche entlanglaufen und unendlich oft ein Musterelement antreffen (darunter eben unendlich oft dasselbe), ohne je an eine Grenze zu stoßen.

Ihrem sehr deutschen Namen zum Trotz ist Doris Schattschneider Amerikanerin. Es ist wohl dem Geschmack ihres heimischen Publikums zuzuschreiben, dass bei der Übertragung von Eschers Original auf die Kaleidozyklen den Teufeln die männlichen Geschlechtsmerkmale abhanden kamen.

Viele Leute haben sich Kaleidozyklen aus den im Buch enthaltenen Vorlagen selbst zusammengebastelt. Darunter

THOMAS GÜTHNER



LUDWIG DANZER

Nachbau des Ikosaedergestrüpps durch Thomas Güthner (links); zwei Ansichten des unentwirrbaren Gestrüpps aus zwölf Balken von Ludwig Danzer (Mitte und rechts)

sind auch Ringe mit acht statt sechs Gliedern. In der Tat ist Marcus Engels Beweisführung auf jede gerade Gliederzahl oberhalb von 6 übertragbar. Ab acht Gliedern dürfen die Tetraeder sogar wieder regulär sein. Allerdings ist die Bewegung für höhere Gliederzahlen nicht mehr zwangsläufig, das heißt, gewisse Teile der Kette sind im Gegensatz zum Sechserring unabhängig vom Rest beweglich. Es gibt sogar einen ganz schrägen Kaleidozyklus, dem die Spiegelsymmetrie fehlt.

Die Idee des Kaleidozyklus ist älter als der Name. Auch der legendäre »Umstülp-Würfelgürtel«, den der Schweizer Tüftler Paul Schatz in den 1930er Jahren fand und aus dem er sein Oloid konstruierte (Spektrum der Wissenschaft 2/1991, S. 10), ist ein sechsgliedriger Kaleidozyklus, und zwar ein ganz spezieller. In seinem Skelett sitzt die Verbindungsstange *b* nicht in der Mitte von *a* (wo sie sich ansonsten wegen der Symmetrie ganz gut macht), sondern an einem Ende, desgleichen für *c*. Das hat zur Folge, dass der Würfelgürtel einige spezielle Konfigurationen wie das gleichseitige Dreieck und das regelmäßige Sechseck exakt annimmt und in einem Zwischenstadium genau in einen Würfel passt.

Im Allgemeinen gibt es bei einem Kaleidozyklus keine Phase, in der wie beim Würfelgürtel mehrere Flächen – eine aus jedem Tetraeder – in einer Ebene liegen. Aber es sieht bei geeigneter Betrachtung zumindest fast so aus. Man kann jede Gruppe derart zusammengehöriger Flächen mit einem übergreifenden Bild versehen. Während der Umstülpbewegung setzt sich dann jedes Bild zusammen und fällt wieder auseinander, um dem Nachfolger Platz zu machen. Statt ganzer Bilder trägt der Kaleidozyklus im Mathematikum immerhin verschiedene Farben.

Ist es nun Größenwahn, dass Albrecht Beutelspacher, der Chef des Mathematikums, einen Kaleidozyklus nicht in der handlichen Papierform, sondern mit dem Durchmesser von monumentalen 4 Metern haben wollte? Ganz im Gegenteil! Das Original ist in jeder Dimension doppelt so groß und soll demnächst das größte »Science Center« der Welt in Guangdong (China) zieren. In Gießen hängt nur der Prototyp, den die Firma Hüttinger in Schwaig bei Nürnberg vorzeigen musste, bevor sie den Bauauftrag bekam.

Noch mehr Gestrüpp

Die »geordneten Gestrüppe« im letzten Oktoberheft (S. 93) haben unerwartete Aktivität ausgelöst. Thomas Güthner aus Trostberg im Chiemgau hat die abgebildete Hohlkugel von Philippe Dubois nachgebaut (Bild oben, links), wobei er die Maße der Stäbe durch Probieren ermittelte. Dabei stellte sich heraus, dass es nur 90 Stäbe sind statt 120, wie ich aus der offiziellen Bezeichnung »ICOF2 120 Burr« falsch erschlossen hatte. Thomas Güthner hat seine Stäbe durch Holzdübel in der richtigen Position fixiert; aber nach Fertigstellung wären diese entbehrlich, denn das ganze Werk hält, da unter Spannung, sehr stramm zusammen.

Ludwig Danzer, heute emeritierter Mathematikprofessor in Dortmund, hat schon vor vierzig Jahren ein Gestrüpp ähnlich dem Zwölfteiler aus vier Balkendreiecken verwendet, um eine Vermutung des bekannten Geometers J. Fejes Tóth zu widerlegen (Proceedings of the Colloquium on Convexity Copenhagen 1965, S. 312). Wenn ein geometrischer Körper über Auswüchse und Einbuchtungen verfügt, kann er sich damit zweifellos mit seinesgleichen zu einem unentwirrbaren Gestrüpp verkeilen. Wenn er aber konvex ist, das heißt keine Stelle hat, in die sich etwas einhaken könnte, ist es schon schwieriger. (Genauer: Ein Körper heißt konvex, wenn er zu je zwei seiner Punkte auch die komplette Verbindungsstrecke dieser Punkte enthält.)

In einer Ansammlung konvexer, punktsymmetrischer Körper gebe es immer einen, den man entfernen kann, ohne einen der anderen zu bewegen, vermutete Fejes Tóth. Dass Konvexität allein nicht ausreicht, wusste er schon. Danzer bewies jedoch, dass auch Konvexität mit Punktsymmetrie nicht hilft. Er fand ein Ensemble von achtkantigen, punktsymmetrischen Zaunpfählen, die an beiden Enden durch je zwei ebene Schnittflächen angespitzt sind. Sie lassen sich nach dem Muster des genannten Zwölfbalkengestrüpps so hoffnungslos ineinander verkeilen, dass selbst die gleichzeitige Bewegung zweier beliebiger Balken das Gestrüpp nicht auflösen kann (Bild oben, Mitte und rechts). ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

M.C. Escher Kaleidozyklen. Von Doris Schattschneider und Wallace Walker. Taschen, Köln 2007

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/912797

AUTOR/LITERATUR

MIT LICHT INS INTERNET

Als Datenträger bietet Licht ungeahnte Möglichkeiten für Büro und Wohnzimmer. Ein optischer Internetanschluss zaubert Nachrichten, Filme und virtuelle Gesprächspartner drahtlos in die eigenen vier Wände.

In Kürze

- **Lichtstrahlen** eignen sich besser als Radiowellen, um Text, Bild und Ton aus dem Internet drahtlos zu mehreren Empfängern in geschlossenen Räumen zu bringen.
- **Optische lokale Netze** nutzen kodiertes Infrarot oder sichtbares Licht zur Datenübertragung an mobile Nutzer daheim und im Büro.
- Da **Photonen** größere Bandbreite bieten als die bei WLAN, WiMAX oder anderen Funknetzen verwendeten Radiowellen, können viele Nutzer in einem Raum arbeiten. Weil Licht nicht durch Wände dringt, ist Abhören fast ausgeschlossen.

Von Mohsen Kavehrad

Seit Langem träumen Elektronikingenieure von allgegenwärtiger Vernetzung – drahtlose Datenübertragung für jedermann, überall und jederzeit. Diesem Ziel nähern wir uns mit großen Schritten: Mehr als zwei Milliarden Menschen telefonieren per Handy, und hunderte Millionen Menschen senden und empfangen Daten mit ihrem Laptop oder anderen Digitalgeräten über ein lokales Funknetz (WLAN, *wireless local-area network*).

Insbesondere genießen immer mehr WLAN-Nutzer die Annehmlichkeit, in Gebäuden ihre drahtlosen Mobilgeräte überall einsetzen zu können. Gleichzeitig rüsten die Hersteller ihre stationären Elektronikprodukte mit drahtloser Fernbedienung aus. Außerdem wollen die Kunden Breitbanddienste im Internet nutzen, ohne an einem Kabel zu hängen.

Doch die Bandbreite in den verfügbaren Radiofrequenzbereichen ist begrenzt, und darum hemmen mangelnde Übertragungsgeschwindigkeit und Kanalkapazität den drahtlosen Zugriff auf Multimediadienste wie Videokonferenzen, Internetfernsehen und Filme auf Abruf. Auch neue, schnellere Funkstandards wie WiMAX sind für drahtlose Breitbandübertragung in Gebäuden nicht gut geeignet, denn sie können auf begrenztem Raum nur wenige Nutzer bedienen und bieten vor allem keine abhörsichere Kommunikation.

Eine interessante Alternative ist Licht als Datenträger. Statt mit Funkwellen arbeiten lokale optische Netze mit weißem oder infrarotem Licht; Letzteres dient bereits in der Fernbedienung heutiger Fernseher als unsichtbares Signal. Optische Systeme können Digitalgeräte drahtlos mit einem Datenanschluss im Zimmer verbinden, der seinerseits von einem zentralen Hochgeschwindigkeitsnetzwerk gespeist wird.

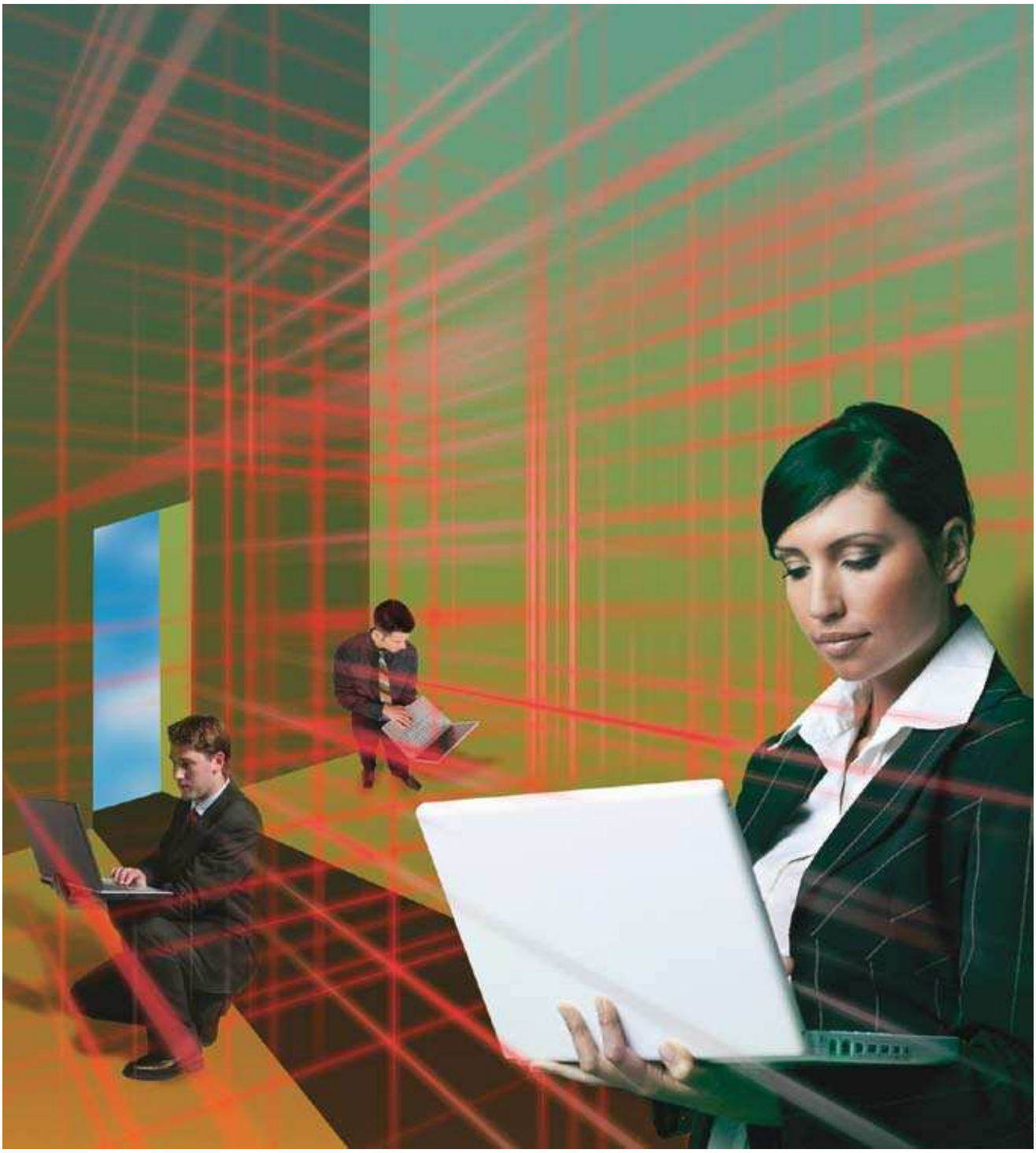
Problem der letzten Meile

Das hat mehrere Vorteile. Die fokussierten, interferenzfreien Datensender ermöglichen fast unbegrenzte Bandbreite für zahlreiche Nutzer. Außerdem garantieren sie fast perfekte Abhörsicherheit, weil Licht im Gegensatz zu Funkwellen nicht durch Wände dringt. Die optische Drahtlosübertragung eignet sich besonders für große Büroräume mit vielen Breitbandnutzern in beengter Umgebung – etwa Fabrikhallen oder Großraumbüros mit vielen variablen Arbeitsnischen.

Vielleicht haben Sie schon vom »Problem der letzten Meile« gehört: Breitbanddienste vom landesweiten Hochgeschwindigkeitsdatennetz zum lokalen Endverbraucher zu bringen ist besonders kostspielig. Hingegen löst die optische Übertragung das »Problem der letzten Meter«: Sie verbindet den Endpunkt des fest verdrahteten Datennetzwerks drahtlos mit den Geräten in einem geschlossenen Raum.

Ingenieure des IBM-Forschungslabors in Zürich untersuchen das Prinzip der optischen

Lichtstrahlen übermitteln Multimediadaten mit hoher Geschwindigkeit an mobile Digitalgeräte. Die Nutzer können sich dabei beliebig im Raum bewegen.



JOHN STILL

Funk kontra Infrarot

Infrarotsysteme, die kodierte Lichtstrahlen durch Mehrfachreflexion diffus im Raum verteilen, sind bei der drahtlosen Übertragung von Breitbanddaten in Innenräumen gegenüber lokalen Funknetzen im Vorteil.

Übertragungsgeschwindigkeit

Funk: Um die Gesundheit in Innenräumen nicht zu gefährden, darf die Senderleistung gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Das beschränkt die maximale Datenübertragungsrate auf einige hundert Megabit pro Sekunde.
Infrarot: Übertragungstempo bis zu ein Gigabit pro Sekunde.

GETTY IMAGES

Infrarot-Fernbedienung

Grenzen der Bandbreite

Funk: Weil Radiosignale derselben Frequenz einander stören, geben die zuständigen Behörden feste Frequenzbänder vor; dies beschränkt die nutzbare Bandbreite.
Infrarot: Photonen stören einander nicht. Die Bandbreite ist nur dadurch begrenzt, wie schnell die Fotodioden des Empfängers eintreffende Daten verarbeiten können.

Sicherheit

Funk: Radiowellen durchdringen Wände und öffnen Schnüfflern Tür und Tor.
Infrarot: Licht dringt nicht durch Wände und kann von außen nicht abgehört werden.

Signalschwund

WLAN-Router

Funk: Wenn kodierte Funkwellen mehrfach von leitenden Oberflächen reflektiert werden, können sie zu etwas unterschiedlichen Zeiten beim Empfänger ankommen. Mitunter sind die Wellen sogar so stark gegeneinander verschoben, dass sie einander komplett auslöschen.
Infrarot: Aus üblichen Quellen emittierte Lichtwellen interferieren nicht. Da die Fotodioden im Empfänger die Wellen separat absorbieren und die einfallende Intensität mitteln, wird das Signal nicht geschwächt.

Störungsquelle

Funk: Interferenz mit Signalen, die von anderen Nutzern auf derselben Frequenz gesendet werden, setzen die Übertragungsgeschwindigkeit herab.
Infrarot: Zufallssignale von anderen Lichtquellen – Sonne oder Lampen – mindern die Übertragungsgeschwindigkeit.

Bis 2010 werden vermutlich mehr als zwanzig Millionen Nutzer über Funknetze drahtlosen Zugang zum Internet haben

Kommunikation in Innenräumen schon seit Anfang der 1980er Jahre. Doch die Technik stagnierte ein Jahrzehnt, weil das Internet noch in den Kinderschuhen steckte und es keinen Bedarf an drahtlosen Breitbandsystemen gab. Das hat sich in den letzten Jahren mit dem erstaunlichen Wachstum des World Wide Web gründlich geändert.

Drahtlose optische Netze arbeiten mit elektromagnetischen Wellen im sichtbaren und infraroten Bereich. Derzeit wird nur sehr schwache Infrarotstrahlung genutzt; ihre Wellenlänge ist größer als bei sichtbarem Licht, aber deutlich kleiner als die von Radiowellen. Erst bei hoher Intensität nehmen wir Infrarotlicht als Wärme wahr.

Optische Verbindungen funktionieren am besten, wenn der Sender direkt auf den Empfänger zielt, wie wir das mit unserer Fernbedienung praktizieren. Doch wie soll man optisch ein ganzes Büro vernetzen oder Flughäfen und Restaurants mit Internetzugang versorgen? Um einen Innenraum vollständig zu erfassen, streuen optische Netzwerke ihre Lichtstrahlen möglichst gleichmäßig. Die datentragenden Infrarotstrahlen werden von allen Oberflächen reflektiert – von Wänden, Tischen, Kaffeemaschinen und sogar von den Gesichtern der Anwesenden. Darum können die Empfänger in jede beliebige Richtung weisen (siehe Kasten auf der Seite gegenüber). Tatsächlich funktionieren einige im Handel erhältliche Infrarotsysteme nach diesem Prinzip, aber die hin- und hergeworfenen Strahlen erzeugen eine Art Echo, das den Datenempfang stört und verlangsamt.

Tausendmal schneller als DSL

Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, hat mein Team an der Pennsylvania State University ein System entwickelt, das viele Kopien der Daten als bleistiftdünne, den gesamten Innenraum wie ein Gitter erfüllende Infrarotstrahlen aussendet. Die schwachen Strahlen, die alle dieselben Signale transportieren, verbinden einen fest mit dem Hochgeschwindigkeitsnetz verdrahteten Internetanschluss mit den empfangsbereiten Geräten im Raum. Die Mehrfachsignale ermöglichen den Nutzern, sich frei im Raum zu bewegen, ohne die Verbindung zu verlieren, denn das mobile Gerät findet immer einen neuen Strahl, wenn der alte blockiert ist.

Da jedes Gerät gleichzeitig mehrere identische Datenströme empfängt, vermag es durch simplen Datenabgleich Fehler zu korrigieren. Das Raumgitter aus feinen Lichtstrahlen gewährleistet rasche Signalübertragung – ein Gigabit pro Sekunde, hundert- bis tau-

sendmal schneller als ein DSL-Anschluss – mit wenigen Übertragungsfehlern.

Wir erzeugen das Lichtnetz mit einem so genannten Strahlformer – einem speziellen holografischen Filter –, der die Strahlen in die gewünschten Richtungen aussendet. Um den holografischen Filter zu konstruieren, beleuchten wir zunächst eine lichtempfindliche Kunststoffschicht aus zwei Richtungen mit dem Bild eines Gitters. Zu diesem Zweck spalten wir den Strahl, der das Bild enthält, mit einem halbdurchlässigen Spiegel auf und führen die beiden Teilstrahlen auf dem Kunststofffilm wieder zusammen. Dadurch wird die lichtempfindliche Schicht aus unterschiedlichen Winkeln mit demselben Gittermuster beleuchtet; es entsteht ein holografisches – dreidimensionales – Bild. Wenn nun der Infrarotsender einen kodierten Lichtstrahl durch den holografischen Filter schickt, erzeugt dieser viele Kopien des Strahls, die ein dreidimensionales Gittermuster bilden (siehe Kasten Seite 104).

Unser Strahlmuster lässt sich nach Wunsch gestalten – fächerförmig, als rechteckiges Gitter oder in Form konzentrischer Kreise. Zum Beispiel werden Fabrikhallen und Großraumbüros üblicherweise gleichmäßig ausgeleuchtet, während das Licht in Museen auf Bilder und Skulpturen fokussiert wird. Ebenso lassen sich die Strahlen der optischen Netze dort konzentrieren, wo viele Breitbandnutzer arbeiten.

Um die von den Digitalgeräten emittierten Antwortsignale aufzunehmen, wird im Raum ein Empfänger platziert, der mit einem so genannten Fliegenauge-Filter ausgestattet ist. Dieser holografische Filter leitet die aus allen möglichen Richtungen kommenden Signale zu separaten Fotodetektoren und verbessert den Empfang durch Kombination der Einzelstrahlen.

Leuchtende Siliziumchips

Diese Infrarotsysteme werden höchstwahrscheinlich bald von lokalen Netzen verdrängt werden, die mit weißem Licht arbeiten. Als Quelle dienen Licht emittierende Dioden (LEDs); sie versprechen noch bessere Breitbandübertragung und sind überdies eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Beleuchtungskörpern.

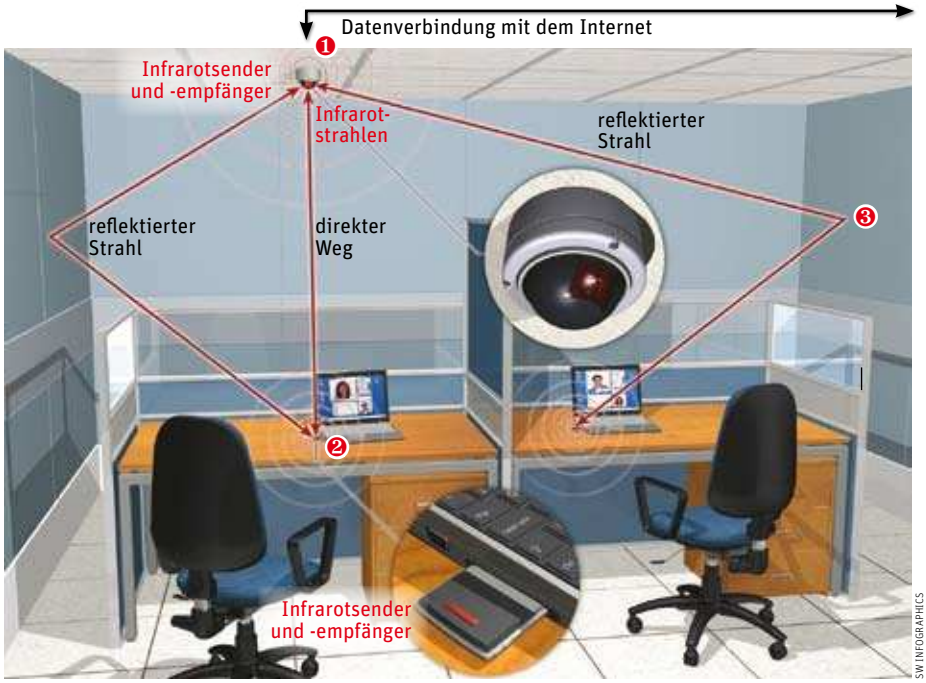
Weiße LEDs sind nicht nur Energie sparend und langlebig wie Leuchtstoffröhren, sondern dem Auge angenehm wie Glühbirnen. Schon in wenigen Jahren werden diese leuchtenden Siliziumchips durch Massenfertigung nach dem Vorbild herkömmlicher integrierter Schaltkreise so billig sein, dass sie sogar Energiesparlampen ersetzen können. Dabei wurde bisher kaum erkannt, dass dieselbe LED-Technik, die Innenräume höchst billig und effizient auszuleuchten vermag, gleichzeitig auch alle entsprechend ausgestatteten Digitalgeräte in diesen Räumen mit drahtlosem Breitbandzugang versorgen könnte. Wer künf-

Wichtige Begriffe

- **WLAN** *(wireless local area network)* ist ein lokales Funknetz für den drahtlosen Datentransport.
- Ein **WLAN-Router** leitet (»routet«) Internetdaten mittels Funkwellen zu mehreren Endnutzern.
- **DSL** *(digital subscriber line)* ist ein digitaler Teilnehmeranschluss für hohe Übertragungsraten, die einen so genannten Breitbandzugang zum Internet ermöglichen.

Wie ein drahtloses optisches Netze funktioniert

Optische Netze verbinden mittels Infrarotstrahlen viele mobile Endgeräte in Innenräumen drahtlos mit dem Internet. Preiswerte Infrarotsender und -empfänger (❶) strahlen Signale zu mobilen Geräten (❷), die mit einer Steckkarte kodiertes Infrarot empfangen und senden. Weil die Lichtsignale im Gegensatz zu Funkwellen nicht interferieren, können viele Geräte das optische Netzwerk gleichzeitig nutzen. Reflexionen an Oberflächen und Wänden (❸) sorgen für guten Netzzugang im ganzen Raum. Ingenieure entwickeln ähnliche Systeme mit weißen Leuchtdioden, die im Signaltakt so schnell flackern, dass das Auge nichts davon wahrnimmt.



Eine weiße LED-Lampe könnte mit der normalen Raumbeleuchtung Breitbanddaten übertragen

tig eine weiße LED-Lampe einschaltet, macht nicht nur Licht, sondern kommt damit auch ins Internet.

Dass Leuchtdioden – anders als übliche Lampen – zur drahtlosen Datenübermittlung taugen, erkannte erstmals vor einigen Jahren ein Forscherteam an der Keio-Universität in Tokio. Mit ihrer enorm schnellen Schaltgeschwindigkeit im Megahertzbereich (Millionen Schaltvorgänge pro Sekunde) können LEDs sichtbares Licht modulieren und mit Daten kodieren. Nach vorläufigen Resultaten meiner Forschergruppe erreicht eine gewöhnliche weiße Leuchtdiode auf diese Weise eine Signalfrequenz bis zu hundert Megahertz. Das hochfrequente Flackern bleibt für das menschliche Auge völlig unsichtbar.

Signale von der Zimmerdecke

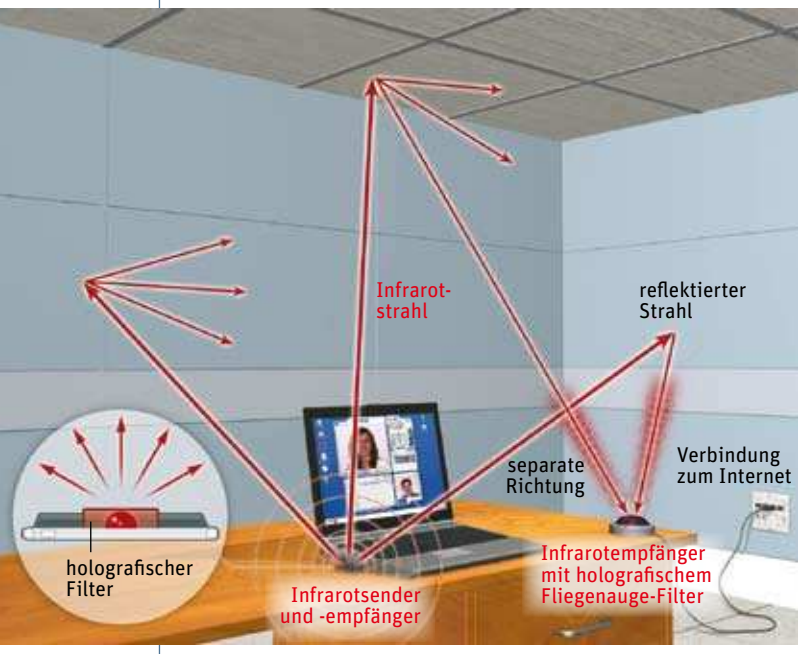
Gegenüber WLAN und Infrarotnetzen haben weiße Leuchtdioden mehrere Vorteile. Wenn sie künftig ohnedies die Raumbeleuchtung übernehmen, wird die Installation des drahtlosen Netzwerks einfacher. Zudem würde der Abschattungseffekt durch Gegenstände, die dem Strahl im Weg stehen, nicht ins Gewicht fallen, denn LED-Lampen wären über den ganzen Raum verteilt und meist an der Zimmerdecke angebracht. Wie alle optischen Systeme sind Leuchtdioden unempfindlich gegen Störung durch Lichtsignale anderer Wellenlänge und bieten dem Datentransfer eine enorme Bandbreite.

Selbst wenn die Nutzer das Licht tagsüber oder nachts ausschalten, werden ihre Laptops nicht vom Netz getrennt: Entweder sorgt eine schwache Stromquelle dafür, dass die LEDs jederzeit genügend Photonen für drahtlose Kommunikation aussenden, oder zusätzliche billige Lichtquellen emittieren unsichtbare Wellenlängen.

Einige Probleme sind noch ungelöst. Wie soll das Rückantwortsystem aussehen, mit dem die drahtlosen Geräte Daten an die weißen LEDs und die dahinter liegende Infrastruktur übertragen? Die Hersteller könnten die Geräte mit Sendern ausstatten – oder mit Einsteckkarten nachrüsten –, die unsichtbare Infrarotsignale zu kleinen Fotodioden-Empfängern in den weißen LED-Leuchten schicken. Oder das System arbeitet nur mit einer sichtbaren Wellenlänge, nutzt aber die Tatsache, dass Leuchtdioden ohndies mit sehr hoher Frequenz gepulst werden; das heißt, kurze

Holografische Filter beseitigen störende Echos

Drahtlose optische Systeme erzeugen Infrarotstrahlen, die von den Oberflächen im Zimmer mehrfach reflektiert werden und dadurch den gesamten Innenraum erreichen. Da die gestreuten Strahlen unterschiedliche Wege zurücklegen, erreichen sie den Empfänger zu verschiedenen Zeiten und erzeugen eine Art Echoeffekt, der das Auslesen der optisch kodierten Daten erschwert.



SW INFOGRAPHICS

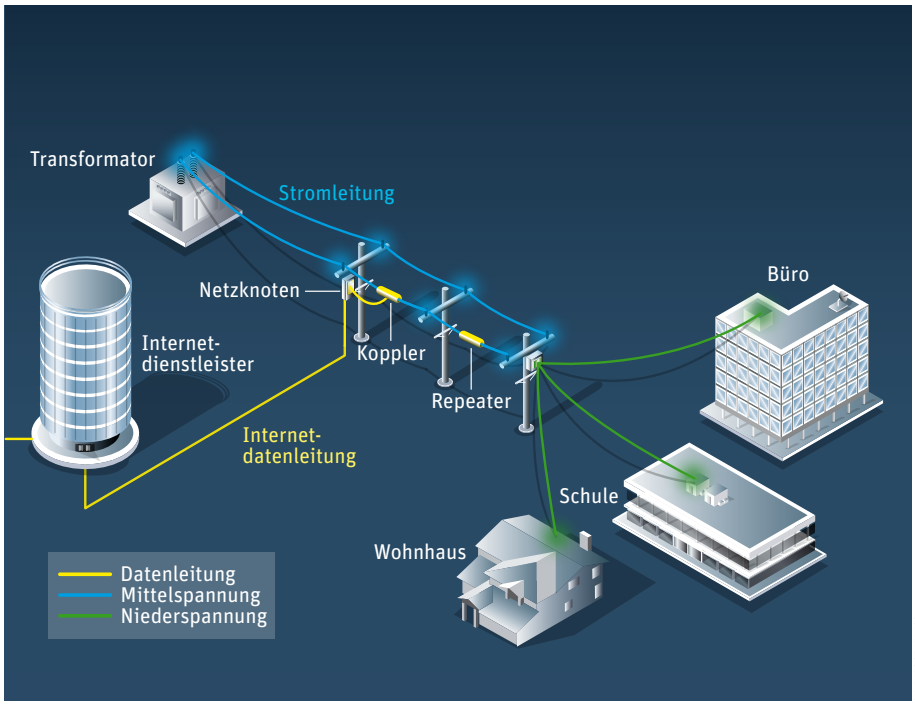
Das führt zu Informationsverlusten und senkt die Übertragungsgeschwindigkeit. Als Lösung erprobt der Autor spezielle holografische Filter. Ein solcher Filter sitzt auf dem Sender; er vervielfacht jeden kodierten Strahl zu identischen Kopien, die den Raum als Strahlengitter komplett ausfüllen. Ein zweiter Filter – eine holografisches Fliegenauge – sitzt auf dem Empfänger (unten rechts). Er sammelt Signale aus verschiedenen Richtungen in separaten Sensoren auf der Fotodiode; dadurch vermag er die Datenströme getrennt zu verarbeiten.

Holografische Filter beruhen auf dem Prinzip des Hologramms, das der ungarische Physiker und Nobelpreisträger Dennis Gabor 1948 erfunden hat. Ein holografischer Film speichert das Interferenzmuster, das bei der Überlagerung zweier Lichtstrahlen entsteht. Der eine – der Referenzstrahl – kommt direkt aus einer Lichtquelle, der andere nimmt den Umweg über das abzubildende Objekt. Beleuchtet man den entwickelten Film hinterher mit dem Referenzstrahl, entsteht das Interferenzmuster erneut, und der Film erzeugt wieder genau das Bild, das man angesichts des realen dreidimensionalen Objekts vor Augen hätte.

Ein holografischer Filter enthält das Interferenzmuster eines dreidimensionalen Lichtgitters, das wie ein unsichtbares Hologramm den Raum erfüllt, wenn der Filter mit einem Infrarotstrahl beleuchtet wird. Da das Licht aller kodierten Gitterstrahlen aus einer Quelle stammt, ist überall im Raum dieselbe Information vorhanden. Das Team des Autors kann die Form des Gitters beliebig an die Raumverhältnisse anpassen; rechteckige, fächerförmige oder konzentrische Lichtmuster sind möglich.

Die Steckdose als Breitbandanschluss

Lokale optische Netze sind besonders praktisch, wenn die Internetdaten zuvor die problematische »letzte Meile« huckepack auf dem normalen Haushaltsstrom reiten. Dieses »Breitband aus der Steckdose« leistet 500 bis 50 000 Kilobit pro Sekunde, vergleichbar mit der Übertragungsgeschwindigkeit von DSL oder Kabel. Ein Internetdienst speist die Daten in einen Netzknoten, der den Eingang ins örtliche Stromnetz bildet. Über einen Koppler wird das Datensignal dem Strom aufgeprägt. Repeater verstärken (»wiederholen«) das Signal unterwegs. Billige Modems an den Steckdosen von Wohnungen, Schulen und Büros wandeln die elektrischen Signale in eine für Digitalgeräte geeignete Form um.



Leuchtphasen werden durch noch viel kürzere Pausen unterbrochen. In den Pausen könnte das Rücksignal empfangen werden. Dieses Zeitduplexverfahren wird zum Beispiel im Mobilfunk angewendet.

Ungeklärt ist auch, wie störend Tageslicht und andere Lichtquellen wirken und wie eine optimale Balance zwischen Raumbeleuchtung und Datenübertragung aussehen soll. Die Forscher suchen noch nach effektiven Verfahren zur Kodierung, Dekodierung, Modulation und Kombination von Signalen im sichtbaren Spektrum, die mit der Beleuchtung harmonieren.

Internet aus der Steckdose

Beide Varianten der drahtlosen Lichtdatentechnik würden sehr von der Möglichkeit profitieren, die berüchtigte letzte Meile zum stationären Nutzer mittels »Breitband aus der Steckdose« *(broadband over power lines)* zu überwinden. Dabei werden die Internetdaten über das normale Stromnetz zur Steckdose übertragen. In den USA bieten Energieversorgungsunternehmen in Ohio, Texas und anderswo diese Dienste zum Preis von DSL-Anschlüssen an. In Europa und Asien – beispielsweise in den Niederlanden, in Spanien, Schweden, Norwegen, Südkorea und Japan – eignet sich das Stromnetz besser für solche Zwecke; in Deutschland gibt es in Dresden, Mannheim und drei weiteren Städten die Möglichkeit, Internet aus der Steckdose zu beziehen.

Der Nutzer könnte nun an seine Steckdose einen kleinen, billigen Adapter anschließen, der die Internetdaten mit Infrarotstrahlen zu allen Digitalgeräten im Raum sendet. In Gebäuden mit weißer LED-Raumbeleuchtung wären keine Adapter nötig.

Wie mein Team gezeigt hat, bietet ein System, das weiße Leuchtdioden für Beleuchtung und drahtlose Kommunikation mit Powerline-Technik verknüpft, eine Übertragungskapazität bis zu einem Gigabit pro Sekunde; hingegen leistet das übliche DSL nur höchstens zwei bis vier Megabit (Millionen Bit) pro Sekunde und ein Kabel rund 50 Megabit pro Sekunde. Dieser Maximalwert wird je nach Form und Größe des Raums nur durch die unterschiedlichen optischen Weglängen eingeschränkt, die das Signal verzerren können. Doch mit einem passend platzierten System können die Techniker diese Verzerrung im Zaum halten oder sogar die Mehrfachsignale nutzen, um die Datenqualität zu verbessern.

Ob mit Infrarot oder mit sichtbarem Licht – die drahtlose optische Datentechnik baut eine Brücke, auf der das Internet die letzten Meter zum Nutzer elegant zu überwinden vermag. Wer in geschlossenen Räumen mit drahtlosen Digitalgeräten arbeitet, wird bald eine neue Möglichkeit haben, auf Breitbandwellen in die Zukunft zu surfen. ◁

Mohsen Kavehrad ist Professor für Elektrotechnik an der Pennsylvania State University und Gründungsdirektor des dortigen Zentrums für Informationstechnikforschung. Er ist Mitglied des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Hybrid MV-LV power lines and white light emitting diodes for triple-play broadband access communications. Von M. Kavehrad und P. Amirshahi in: Achieving the triple play: technologies and business models for success. International Engineering Consortium, Januar 2006

Transmission channel model and capacity of overhead multi-conductor medium-voltage power lines for broadband communications. Von P. Amirshahi und M. Kavehrad in: IEEE consumer communications and networking conference, Las Vegas, Januar 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/912786.

SPIELFILM

Wenn Füchse bei Vollmond tanzen

Diese Verfilmung einer wunderbaren – und problematischen – Freundschaft zwischen Mensch und Tier lässt uns die heimischen Wälder mit ganz anderen Augen sehen.

Der französische Regisseur Luc Jacquet ist mit dem Film »Die Reise der Pinguine« auf einen Schlag berühmt geworden (Spektrum der Wissenschaft 10/2005, S. 98). In einmalig schönen und anrührenden Bildern erzählt er vom Leben der Kaiserpinguine – und macht in meinen Augen und denen vieler anderer nur einen einzigen Fehler: Er vermenschlicht seine tierischen Helden, indem er ihnen Menschenstimmen in den Mund legt.

Fast scheint es, als hätte Jacquet diesen Fauxpas in seinem neuen Film korrigieren wollen. Hier lautet seine Botschaft: Du sollst das Tier nicht vermenschlichen und vor allem nicht für dich vereinnahmen. Und das, obwohl »Der Fuchs und das Mädchen« in erster Linie eine Mischung aus Märchen und Fabel ist und der Zuschauer daher einer Vermenschlichung wohl durchaus zugeneigt wäre.

Die Geschichte spielt diesmal nicht in der fernen Antarktis, sondern im heimischen (französischen) Wald. Die Zehnjährige Lila begegnet auf ihrem Schulweg am Waldrand einem Fuchs und ist so fasziniert, dass sie nichts unversucht lässt, um ihm weitere Male zu begegnen. Diese Begeisterung hält auch an, als sie sich bei der Spurensuche im Schnee ein Bein bricht und der Gips sie ans Haus fesselt. Während Lila aus Büchern und Bildern immer mehr über Füchse lernt und sinnend aus dem Fenster schaut, fesselt der Regisseur den Zuschauer mit packenden Actionszenen wie etwa einer mitreißend gefilmten Verfolgungsjagd: Luchs jagt Fuchs.

Auch das Familien- und Sozialleben unseres Helden wird gezeigt, beim ausgelassenen Spiel ebenso wie bei dem märchenhaft anmutenden Fuchstanz bei Vollmond. Hier wird sich mancher Zuschauer fragen, wie der Regisseur diese Aufnahmen nur hingekriegt hat. Die Gefahr, die dem Fuchs durch die Menschen droht, wird ebenfalls thematisiert: Der neue Gefährte des – weiblichen – Fuchses stirbt an einem vergifteten Köder. Lila wusste aus den Gesprächen der Erwachsenen von den Fallen und hatte große Angst. »Aber die Stimme eines kleinen Mädchens zählt ja nicht.«

Doch Lilas besonderer Freund überlebt, und im Frühjahr macht sie sich wieder auf die Suche. Es kostet sie viel Zeit, Mühe und Geduld; doch der Fuchs und das Mädchen nähern sich einander immer weiter an. Es ist ein köstliches Fest, wenn Lila und ihr Fuchs sich bei der Verfolgung etlicher von Pfütze zu Pfütze hüpfender Frösche spielerisch immer näherkommen. Diese Szene kann als »Beginn einer wunderbaren Freundschaft« gelten. Am Ende darf Lila ihren Fuchs sogar berühren – ein Zeichen der Vertrautheit, das ihr besonders wichtig ist. Als sie bei einem der nun regelmäßig folgenden Streifzüge mit ihrem neuen Freund den Weg nach Hause nicht mehr rechtzeitig findet und ins Dunkel gerät, sogar im Wald von all den Geräuschen und Tieren völlig verängstigt ist, bleibt der Fuchs bei ihr und teilt ihren Schlaf.

Bei all den rührenden und fröhlichen Szenen kommt an solchen Stellen immer wieder zum Vorschein, dass Lila eben doch ein Kind ist und nicht merkt, wenn sie sich in ihrer Begeisterung und Zuneigung ernsthaft in Gefahr bringt. Sie klettert in Gegenden herum, die den Kindern des Dorfs streng verboten sind; sie verirrt sich im Wald; sie begegnet außer den vielen anderen Tieren des Waldes auch einem Bären, und sie beschützt ihren Fuchs vor Wölfen, die auch sie hätten angreifen können. Deutlich erkennt man ihr Bedürfnis, dem Fuchs immer näherzukommen und ihn letztlich in Besitz zu nehmen wie ein Kuscheltier.

Dieser Wunsch führt am Ende auch zur Katastrophe. Als Lila den Fuchs zu sich nach Hause lockt und der sich in ihrem Zimmer plötzlich gefangen fühlt, springt er in Panik durch das geschlossene Fenster nach draußen und verletzt schwer sich an den Scherben – eine grandios gefilmte, schockierende Szene.

An dieser Stelle hätte der Film ein konsequentes, wenn auch sehr bitteres Ende gefunden. In der Realität würde der Held des Films einen so massiven Blutverlust schwerlich überleben. Aber das wollte Jacquet seinen Zuschauern wohl doch nicht antun. Als Lila das fast leblose Tier aus seinem Blut hebt und zu seinem Bau und den dort wartenden Jungen bringt, kippt das Märchen ins Melodram: Der Fuchs ist plötzlich wieder erholt und wandert mit Lila im Gegenlicht.

Der Eindruck des Märchens entsteht nicht nur durch diese wundersame Wendung. Es sind auch die unwirklich schönen Bilder und die Stimme der Icherzählerin, die den Zuschauer durch den ganzen Film leitet. Die inzwischen erwachsene Lila erzählt von ihren Kindheitserinnerungen. Am Ende sitzt sie am Bett ihres kleinen Sohns – im selben Zimmer, das wir aus dem Film

Nicht nur im Winter, zur Paarungszeit, sondern auch im Sommer tanzt der Fuchs.

Lila über die Füchsin: »Ich war Teil ihres Lebens geworden. Ich liebte es, mit ihr zusammen zu sein, mochte unser wildes Herumtollen, ihre schönen gelben Augen …«

schon kennen –, erzählt ihm die ganze Geschichte und auch, wie es dann noch weiterging. Dabei wird auch noch einmal die Moral der Geschichte ganz deutlich herausgestellt.

Der Regisseur hat in diesem Film eigene Kindheitserlebnisse verarbeitet. Es war eine gute Idee, diese in die Form eines Märchen zu kleiden. Manches wirkt allerdings etwas dick aufgetragen. Dass Luc Jacquet ein so hervorragender Tierfilmer ist, macht das Anschauen trotzdem zu einem Genuss. Nicht nur die Haupdarsteller Bertille Noël-Bruneau und der Fuchs sind fantastisch. Die Nebendarsteller wie Bär, Dachs, Wildschwein, Hirsch und Wolf sind so eindrucksvoll kaum anderswo zu sehen und wecken ein ganz neues Gefühl für das Abenteuer Wald – auch wenn es im echten Wald nicht entfernt so von Wildtieren wimmelt wie in diesem Film.

»Der Fuchs und das Mädchen« ist empfehlenswert für die ganze Familie – wenn die ein Interesse für solche Themen aufbringt. Der Film ist freigegeben ohne Altersbeschränkung; aber wer ihn mit kleinen Kindern betrachten will, sollte bedenken, dass mindestens eine Szene sogar Erwachsene schockiert.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei Spektrum der Wissenschaft, in Elternzeit.

Luc Jacquet (Drehbuch und Regie), Eric Rognard (Drehbuch), Gérard Simon, Eric Dumage, François Royet (Kamera)

Der Fuchs und das Mädchen (Le renard et l'enfant)

Kinofilm, Start 27. Dezember 2007

Buch zum Film: Aus dem Französischen von Ulrike Jamin-Mehl. Gerstenberg, Hildesheim 2007. 48 Seiten, € 12,90

PHYSIK

Einstein für alle

»Er wäre auch dann der größte Physiker aller Zeiten, wenn er nicht eine Zeile über die Relativität geschrieben hätte.«

Zwischen den Zeilen seines Buchs steht es unübersehbar geschrieben: Thibault Damour, vielfach ausgezeichneter Professor der Theoretischen Physik am Institut des Hautes Études Scientifiques (IHES) in der Nähe von Paris, bedauert, dass die Errungenschaften Albert Einsteins (1879 – 1955) noch immer nicht Teil der Allgemeinbildung sind. Nachdem sein Werk ein ganzes Jahrhundert lang die Physik prägte und seine wissenschaftlichen Nachfahren erst jetzt allmählich wagen, die Grenzen seiner Theorien auszuloten, sind die physikalischen und philosophischen Konsequenzen seiner revolutionären Entdeckungen noch lange nicht zu jedem durchgedrungen.

Auch Damours Büchlein wird diesem Missstand nicht auf breiter Front abhelfen. Eine gelungene und vergleichsweise leicht lesbare Einführung in das Werk (nicht das Leben) Einsteins ist es gleichwohl. Frei von mathematischen Formeln, in makellosem Stil und erzählerischer Sprache verfasst, schreitet es präzise die Denkpfade des großen Physikers ab. Und liefert dem Leser dank der didaktischen Bemühungen Damours kaum je einen Anlass, mit einem resignierten »Das werde ich nie verstehen« die Lektüre aufzugeben.

Im Gegenteil: Es ist spannend von Anfang an. Plötzlich verliert das »Jetzt« seine absolute Bedeutung, da in jedem Bezugssystem die Uhren anders ticken können. Den absoluten Raum ersetzt Einstein durch eine elastische und sich krümmende Raumzeit, die Damour am Beispiel von *veal in aspic*, glibberiger Kalbssülze, erklärt. Isaac Newton und fast alle seine Nachfolger hatten geglaubt, auf die Definition von Zeit, Raum, Ort und Bewegung verzichten zu können, »as being well known to all«. Erst Einstein fasst diese Begriffe neu und zeigt, wie sie untrennbar miteinander verbunden sind. Die Konsequenzen dieser Erkenntnis reichen weit über ein Physikerlabor hinaus, schließlich gaben sie sogar dem zu seiner Zeit schon gängigen Begriff der Kosmologie ein völlig neues Gesicht.

Damit nicht genug. Einstein erhielt seinen Nobelpreis für die Entdeckung des photoelektrischen Effekts, postulierte die induzierte Emission von Licht, die ab 1967 Grundlage für den Laser wurde, und sah das Bose-Einstein-Kondensat voraus, das die Beobachtung eines quantenmechanischen Phänomens auf makroskopischer Ebene erlaubt. Sogar seine »spukhafte Fernwirkung«, nämlich die Verschränkung von Quanten, wurde mittlerweile beobachtet. »Einstein wäre auch dann einer der größten theoretischen Physiker aller Zeiten«, so formulierte Max Born mit guten Gründen, »wenn er nicht eine Zeile über die Relativität geschrieben hätte.«

Einstein (links oben) spricht im März 1922 am Collège de France; Langevin hinter ihm souffliert ihm französische Vokabeln. Aus der Zeitschrift »L'illustration«

Ob Einstein völlig Neues schuf oder Perspektiven aufgriff, die andere vor ihm eröffnet hatten: Sein Genius manifestiert sich in Damours Augen vor allem darin, dass er die Resultate (nur) theoretischer Überlegungen ernst nahm, weiterentwickelte und so ihre revolutionären Konsequenzen aufdeckte. So hatte Max Planck mit dem Wirkungsquantum eine neue Naturkonstante gefunden, erst Einstein aber gab ihr eine physikalische Bedeutung, indem er behauptete, dass Energie in der Natur tatsächlich in Portionen, in »Quanten«, vorkomme. Und Henri Poincaré hatte als Erster die mathematische Struktur der Raumzeit beschrieben, ihr aber lediglich den Status einer nützlichen Konvention zugebilligt. Einstein hingegen betrachtete sie als reales Phänomen und gelangte so zu grundlegenden Erkenntnissen über die physikalische Wirklichkeit.

Ja, er war genial

Nur gelegentlich ist der Leser ein wenig irritiert, wenn Einsteins unbestreitbare wissenschaftliche Größe wieder und immer wieder zum drängenden Thema gemacht wird. »Wir haben verstanden!«, möchte man dem Autor dann zurufen. Und wenn dieser schon beiläufig erwähnt, dass die Formel $E = mc^2$ für die Entwicklung der Atombombe praktisch keine Rolle spielte, sollten auch andere Hinweise nicht fehlen. Etwa dass Einstein 1939 dem US-Präsidenten Franklin Roosevelt in einem Brief (den andere verfasst hatten, den aber er unterzeichnete) die Entwicklung der Kernspaltungsbombe eindringlich nahelegte; in Berlin fänden nämlich entsprechende Forschungen statt.

Darum sei an dieser Stelle auch auf Walter Isaacsons »Einstein. His Life and Universe« (Simon & Schuster, New York 2007) verwiesen, das der ausgewiesene Wissenschaftshistoriker Jeroen van Dongen im Fachjournal »Science« (10. August 2007) empfahl. Es bezieht seinen Reiz unter anderem daraus, dass es auch jene Dokumente aus Einsteins Privatkorrespondenz aufarbeitet, zu denen die Einstein-Archive der Hebräischen Universität in Jerusalem erst seit Ende Sommer 2006 Zugang gewähren.

Thilo Körkel

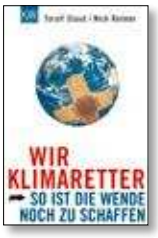
Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Thibault Damour
Once Upon Einstein
Aus dem Französischen von Eric Novak.
A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2006.
200 Seiten, $ 27,–

KLIMA

Kann denn Fliegen Sünde sein?

Im Prinzip ja. Und der plakativen Ausdrucksweise zum Trotz bieten die Autoren originelle und innovative Ideen zum Klimaschutz.



Der Klimawandel ist zurzeit in aller Munde. Insbesondere der neue Bericht des mittlerweile nobelpreisgekrönten Weltklimarats (IPCC) und die klimapolitischen Aktivitäten von Angela Merkel bescherten dem Thema in diesem Jahr eine enorme mediale Präsenz. In all dem Wirbel geht allerdings fast unter, dass den vielen großen Worten bislang – auch in Deutschland – nur sehr mangelhafte Taten gegenüberstehen.

Die Journalisten Toralf Staud und Nick Reimer beginnen ihr Buch mit einer Ursachenanalyse dieses Missverhältnisses. Der anthropogene Klimawandel lege zwei »Grundprobleme des Kapitalismus bloß: Wachstum heißt sein erstes, die Externalisierung von Kosten sein zweites«. Würde diese Wirtschaftsweise unreguliert sich selbst überlassen, wäre eine ungebremste Freisetzung von Treibhausgasen in das »Gemeingut« Atmosphäre unausweichlich. Das gesellschaftliche Leitmotiv »größer, schneller, weiter« mitsamt dem von Geschwindigkeitsrausch und Konsumismus geprägten Lebensstil trage ebenfalls zum Klimaproblem bei. Und das sei nicht unbedingt ein Charakterfehler des Einzelnen: Gewisse politisch-ökonomische oder auch technologische Strukturen »legen bestimmte Lebensweisen nahe«, und man brauche dann »fast einen Heiligenschein«, um anders zu handeln. Bislang erliege die Politik jedoch zu oft mächtigen Wirtschaftslobbys und dem kurzfristigen Wiederwahlinteresse.

Trotz dieser vertrackten Lage, so die optimistische Kernbotschaft der Autoren, sei gefährlicher Klimawandel selbst mit bereits verfügbaren Technologien noch abzuwenden. Dies sei sogar weit gehend ohne Verlust an Lebensqualität zu haben und zudem viel billiger als Nichtstun, bei dem man später mit drastischen und teuren Klimafolgen konfrontiert würde. Es müsse nur jetzt schnell und mutig gehandelt werden. Da die Industrieländer als Hauptverursacher des menschengemachten Treibhauseffekts die Hauptverantwortung tragen, sind sie es, die sowohl emissionsarme gesellschaftliche Alternativen vorleben und den ärmeren Ländern freizügig zur Nachahmung anbieten als auch Kompensationszahlungen für dort auftretende Klimaschäden leisten müssen.

Ausbuchstabiert wird die Kernbotschaft in Form von elf Vorschlagsbündeln, deren Realisierung nach Meinung der Autoren in Deutschland zu einer Halbierung der heutigen Kohlendioxid-Emissionen bis 2020 führen würde. Die durchweg konkreten Vorschläge beziehen sich vorwiegend auf die vier besonders emissionsrelevanten Bereiche Energieversorgung, Verkehr, Bauwesen und Landwirtschaft und umfassen Appelle an die Einzelnen sowie von Politik und Wirtschaft umzusetzende Maßnahmen (siehe auch »Eindämmung des Kohlendioxids« von Robert H. Socolow und Stephen W. Pacala, Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2007 »Energie und Klima«).

Viele der Ideen beruhen auf dem Grundprinzip, dem Ausstoß von Kohlendioxid einen Preis zu geben. Ein radikaler und inte-

ressanter Ansatz ist die Individualisierung des Emissionshandels durch die Einführung eines Kohlendioxid-Kontos für jeden Menschen mit global gleichen jährlichen Pro-Kopf-Emissionsrechten. Wer sein Guthaben vor Jahresende aufgebraucht hat, müsste noch verfügbare Emissionsrechte von anderen erwerben. Dabei würden erhebliche Geldmengen von den reichen Ländern in ärmere Regionen fließen. Durch Einführung einer Kerosinsteuer und die Berechnung der Kfz-Steuer auf der Basis des CO_2-Ausstoßes würden weitere – überfällige – Anreize zu emissionsärmerem Verhalten geschaffen.

Im Bereich der erneuerbaren Energien setzen die Autoren besonders auf solarthermische Kraftwerke, deren Strom relativ verlustfrei von Südeuropa und Nordafrika nach Deutschland transportiert werden könnte, und auf Offshore-Windparks. Jeder könne innerhalb von fünf Minuten den Umbau des Energiesystems in diese Richtung beschleunigen, indem er zu einem Ökostromanbieter wechselt. Unter den fossilen Energien sollten vor allem kleine Gaskraftwerke in Kraft-Wärme-Kopplung zum Einsatz kommen. Der Neubau von Kohlekraftwerken sollte verboten werden, solange das so genannte CCS-Verfahren *(carbon capture and storage)* zur Abscheidung des Kohlendioxids direkt am Kraftwerk und anschließenden Lagerung in geologischen Formationen nicht als sichere Technologie zur Verfügung steht. Für mehr Energieeffizienz bieten sich ordnungspolitische Emissionsgrenzwerte an, sei es für Kühlschränke, Autos oder den Heizwärmebedarf von Häusern. Damit ließe sich auch der nötige Druck auf die Industrie ausüben, denn technisch sei oft viel mehr möglich, als bisher umgesetzt wird.

Bei der Ernährung lautet die Devise »weniger Fleisch, mehr Bio«, unter anderem weil tierische Produkte mit Methan-Emissionen aus Wiederkäuermägen verbunden sind und in der konventionellen Landwirtschaft große Mengen Kunstdünger eingesetzt werden. Schließlich wird zum Pflanzen von Bäumen und zur Ersetzung von energieintensiven Baustoffen wie Ziegel oder Zement durch Holz aufgefordert, da der Atmosphäre dadurch Kohlendioxid entzogen wird.

Der außerordentlich gut les- und verdaubare Reportagestil sorgt für eine angenehme Lektüre. An die stellenweise etwas moralisch-pathetische Sprache kann man sich gewöhnen, und letztlich haben Slogans wie »Fliegen ist Sünde« oder »Fleisch ist ein Stück Klimakollaps« auch einen gewissen Unterhaltungswert. Obwohl die Autoren meist gut informiert Argumente und Gegenargumente ausbreiten, neigen sie im Eifer des Gefechts zuweilen zu einer etwas suggestiven Faktenwiedergabe, etwa wenn sie die steigenden Schadenssummen durch Extremwetterereignisse allzu einseitig mit dem Klimawandel in Verbindung bringen oder die Atmung der globalen Viehherden als gewaltige Kohlendioxidquelle darstellen, was zwar stimmt, aber zunächst keinen Nettoeffekt hat. Die meisten der emissionssenkenden Vorschläge sind sinnvoll, viele in der Tat sofort umsetzbar, manches dagegen erscheint politisch etwas naiv und unterschätzt die derzeitigen Machtverhältnisse.

Eines allerdings fällt auf: Kaum ein Vorschlag adressiert das als eine Ursache des Klimaproblems identifizierte Wirtschaftswachstum. Offenbar gehen die Autoren davon aus, dass sich das erste der beiden anfangs diagnostizierten Grundprobleme des Kapitalismus durch die Lösung des zweiten kurieren lässt.

Wer sich aktiv am Klimaschutz beteiligen will und eine anregende Sammlung von originellen und innovativen Ideen sucht, ist mit dem vorliegenden Buch gut beraten.

Oliver Walkenhorst

Der Rezensent hat Physik studiert und arbeitet am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

Toralf Staud und Nick Reimer
Wir Klimaretter
So ist die Wende noch zu schaffen
Kiepenheuer & Witsch, Köln 2007, 316 Seiten, € 8,95

MEDIZIN

Eine Standortbestimmung der Psychiatrie

Viele Methoden mit Alleinvertretungsanspruch einerseits, integrierende klinische Praxis andererseits: Das war das beherrschende Thema der Psychiatrie des 20. Jahrhunderts.

Für kaum eine andere Fachdisziplin ist es so wichtig wie für die Psychiatrie, immer wieder aufs Neue ihre Grundannahmen kritisch zur Disposition zu stellen und zu reflektieren. Denn die Wahrnehmung und Beurteilung psychischen Andersseins wird durch die jeweils aktuellen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Sichtweisen in hohem Maß beeinflusst und eingeengt, was die Gefahr einer unkritisch einseitigen Praxis einschließt. Für kaum eine andere Fachdisziplin ist dieser selbstkritische Diskurs aber auch so schwierig. Denn im Nachdenken über nicht »normales« psychisches Verhalten reflektiert das Gehirn über sich selbst, und damit stellen sich alle Probleme der Selbstreferenz. Psychiater haben deshalb guten Grund, die Begrenztheit ihrer Denkschemata zur Kenntnis zu nehmen und immer wieder andere Wahrnehmungs- und Beurteilungsmodelle auf ihre Tauglichkeit zu befragen. Eine Auseinandersetzung mit der Geschichte des eigenen Fachs bietet dafür gute Ansatzpunkte.

Es ist deshalb sehr zu begrüßen, dass sich Heinz Schott, Professor für Geschichte der Medizin und Leiter des Medizinhistorischen Instituts der Universität Bonn, und Rainer Tölle, ehemaliger Lehrstuhlinhaber und Leiter der Klinik für Psychiatrie der Universität Münster, zusammengetan haben, um aus ihren unterschiedlichen Perspektiven »Geschichte und Aktualität der Psychiatrie zusammenzubringen«. Sie erfüllen damit ein dringendes Bedürfnis, denn »die gegenwärtigen Lehrbücher der Psychiatrie gehen im Allgemeinen nicht mehr auf die Geschichte des Faches ein, wie auch umgekehrt die psychiatriehistorischen Standardwerke den aktuellen Stand der Psychiatrie in der Regel ausblenden«.

Das Buch beginnt mit einem Kapitel über die historischen Voraussetzungen der klinischen Psychiatrie, von der Dämonologie und deren Bedeutung in der gesamten Medizingeschichte über die Ideen der Aufklärung und der Romantik, das Werk von Wilhelm Griesinger (1817–1868), der in der Mitte des 19. Jahrhunderts »eine Magna Charta entwarf, auf die sich die Psychiatrie bis heute berufen kann«, und die Vorläufer der Psychoanalyse bis schließlich zur Degenerationslehre und Eugenik.

Das 2. Kapitel »Moderne Begründungen, Entwicklungen und Irrwege« beschäftigt sich mit der »klinischen Psychiatrie«, deren Beginn die Autoren an die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert verlegen. Allgemein wird diese Methode Emil Kraepelin (1856–1926) zugeschrieben. Gemeint ist »die wissenschaftliche Arbeit am Patienten, besser gesagt mit dem Patienten, und zwar nicht a priori theoriebezogen und auch nicht hauptsächlich methodebezogen«.

Die Beobachtung stand im Vordergrund; aber naturgemäß blieb die Bildung von Theorien und Methoden nicht aus. Nur entwickelte sich an Stelle eines einheitlichen Systems eine Vielzahl von Ansätzen: Naturwissenschaftlich-biologische, psychodynamische, psychopathologische, phänomenologische und sozialpsychiatrische Theorien und Methoden verstanden sich als unabhängig von den jeweils anderen und beanspruchten, die Psychiatrie zu repräsentieren. Demgegenüber beharrten die Vertreter des Kraepelin'schen Standpunkts darauf, sich nicht vorab auf eine der zahlreichen Methoden festzulegen, sondern sie alle zur Auswahl bereitzuhalten und/oder zu integrieren. In den Augen der Autoren ist das zentrale Thema der Psychiatrie des 20. Jahrhunderts die Auseinandersetzung zwischen diesen beiden Richtungen und nicht der weitaus bekanntere Gegensatz zwischen biologisch und dynamisch/psychosozial orientierten Ansätzen.

Es folgen ein Kapitel zur Krankenversorgung von den Vorläufern in Orient und Okzident bis zur Psychiatriereform und ihren Folgen sowie ein Kapitel zur Krankheitslehre und den wichtigsten psychiatrischen Erkrankungen. Eher knapp ist das nachfolgende Kapitel über die therapeutischen Ansätze von Beginn des 19. Jahrhunderts bis heute gefasst.

Dem Patienten als Person begegnen

Im letzten Kapitel sprechen Schott und Tölle schließlich die grundsätzlichen Fragen an, »die sich aus dem Blickwinkel des psychiatrischen Patienten ergeben und sein Leben, seine Bedürfnisse und Interessen betreffen«. Hier geht es um die Stigmatisierung durch Krankheitsdiagnosen mit ihrer »geradezu bedingungslosen Klassifikation« durch die Systeme DSM und ICD und darum, wie bedeutsam es ist, die Subjektivität des Patienten anzuerkennen und ihm als Person zu begegnen. Weitere Themen sind das Problem der Zwangsbehandlung und die unterschiedlichen Aufträge der Patienten und der Gesellschaft an den Psychiater.

Zum Abschluss wird die entscheidende Frage gestellt, nämlich die nach dem Menschenbild der Psychiatrie. Die Autoren nehmen zu der in unserer Zeit dominierenden molekulargenetischen Biologisierung des Menschen kritisch Stellung, bedauern die Anlehnung der heutigen Psychiatrie an die Theoriebildung der Neurowissenschaften und vermissen zu Recht die Auseinandersetzung mit den grundlegenden Fragen einer medizinischen Anthropologie.

Tatsächlich ist es ein gravierender Unterschied, wie ein Arzt die Krankheit seines Patienten versteht: im Sinn der Aufklärung als Defektzustand, im Sinn der Romantik als »Kehrseite« oder »Nachtseite« der Normalität oder im Sinn der Postmoderne – von den Autoren gar nicht angesprochen – als eine durchaus kreative Lösung einer eigentlich unlösbaren Situation. Jede dieser Positionen führt zu einer anderen Haltung dem Patienten gegenüber, zumal implizit jeweils eine andere Antwort auf die unausweichliche Frage nach der Schuld an der Krankheit gegeben wird. Die Autoren schließen dieses letzte Kapitel ihres Buchs mit einem Rekurs auf Viktor von Weizsäcker und seine Einführung des Subjekts in die Medizin und fordern implizit, dass die Psychiatrie den Menschen in seiner Subjektivität zu ihrem Gegenstand machen müsse und ihn nicht auf einen Objektstatus reduzieren dürfe.

Den Autoren ist zweifellos eine bedeutende Darstellung der Geschichte der Psychiatrie gelungen, die für jeden Kliniker von hohem Interesse ist oder zumindest sein sollte. Am Ende stellt sich allerdings heraus, dass entscheidende Fragen auf den letzten 15 Seiten viel zu gedrängt behandelt wurden. Ich hätte mir – vielleicht etwas unbescheiden – gewünscht, dass diese Fragen noch stärker die einzelnen Kapitel bestimmt hätten und zum Abschluss wesentlich eingehender behandelt worden wären. Dafür hätte ich auf manche ermüdende Detailangabe gern verzichtet.

Wilhelm Rotthaus

Der Rezensent war Leiter des Fachbereichs Psychiatrie und Psychotherapie des Kindes- und Jugendalters der Rheinischen Kliniken Viersen und ist Arzt für Kinder- und Jugendpsychiatrie in Bergheim bei Köln.

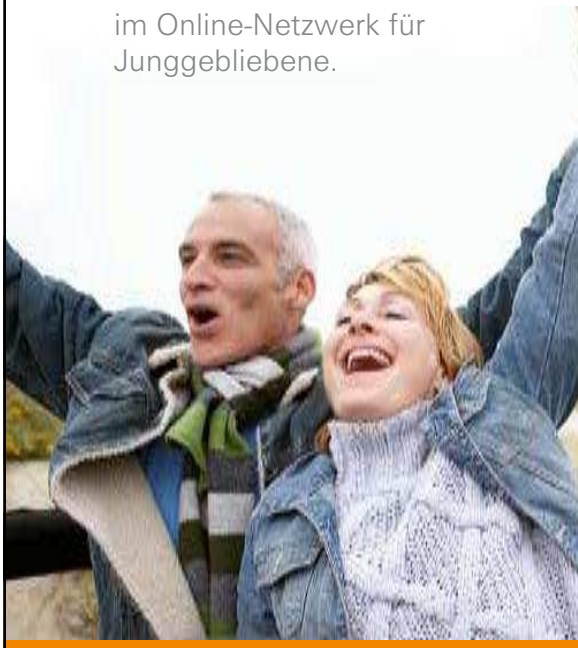
Heinz Schott, Rainer Tölle
Geschichte der Psychiatrie
Krankheitslehren, Irrwege, Behandlungsformen
C.H.Beck, München 2006.
688 Seiten, € 39,90

Das Netzwerk für die Generation der Junggebliebenen

Knüpfen Sie Kontakte zu Menschen Ihrer Wellenlänge.

Tauschen Sie Wissen, Erfahrungen und Meinungen.

Einfach und kostenlos im Online-Netzwerk für Junggebliebene.



Jetzt mitmachen!

www.platinnetz.de

Platinnetz
Verbindungen leben.

PHILOSOPHIE

Wie weit reicht das Folterverbot?

Keiner der Autoren ist bereit, die gewaltsame Erzwingung von Aussagen bedingungslos zu verdammen – wenn sie der Lebensrettung dient.

Die Frage, ob Folter unter bestimmten Bedingungen erlaubt ist oder auch nur sein könnte, kann leicht Argwohn hervorrufen. Bereits das Wort weckt Assoziationen an Misshandlungen wie jüngst in Abu Ghraib oder an mittelalterliche Hexenprozesse. Dass es gleichwohl möglich ist, sich mit der genannten Frage auf umsichtige und vernünftige Weise auseinanderzusetzen, beweist der vorliegende Sammelband. Er geht auf ein Symposium zurück, das im April 2005 an der Universität Osnabrück stattfand.

Anlass der Diskussion ist ein Fall, der viele Schlagzeilen gemacht hat: Um das Leben des entführten elfjährigen Jakob von Metzler zu retten, hatte der damalige Frankfurter Polizei-Vizepräsident Wolfgang Daschner den Entführer Magnus Gäfgen durch Gewaltandrohungen dazu veranlasst, das Versteck des Entführten preiszugeben.

Zusätzlich zu diesem Fall diskutieren die Beiträge des Symposiums fiktive Szenarien wie das eines Terroristen, der eine Bombe mit Zeitzünder in einer bevölkerungsreichen Gegend versteckt hat und die Auskunft über deren Ort verweigert. Es geht der Idee nach ausschließlich um Situationen, in denen die Androhung und Durchführung von körperlichen und psychischen Zwangsmaßnahmen als einzig verbleibende Möglichkeit erscheint, eine Gefahr abzuwenden, die von der Person, der diese Maßnahmen angedroht werden, selbst verschuldet wurde. Viele Autoren legen daher Wert darauf, den Reizbegriff »Folter« möglichst zu vermeiden, und sprechen um der begrifflichen Abgrenzung willen zum Beispiel von »selbstverschuldeter Rettungsbefragung«.

Die fünf Aufsätze des ersten Teils »Juristische Aspekte« lesen sich auch für juristische Laien mit Gewinn: Der Leser bekommt einen Eindruck von dem komplexen Neben- und Übereinander von Grundgesetz, Europäischer Menschenrechtskonvention, Strafgesetzbuch und Polizeirecht. So argumentiert Volker Erb von der Universität Mainz unter Verweis auf den Notwehrparagrafen dafür, dass Maßnahmen zur Erzwingung einer Aussage, auch für Polizeibeamte in Ausübung ihrer Dienstpflicht, unter bestimmten Umständen als straffrei im Sinn des Strafgesetzbuchs gelten können. Jörn Ipsen aus Osnabrück weist allerdings darauf hin, dass derartige Maßnahmen, selbst wenn man Erbs Argumentation folgt, immer noch gegen geltendes Polizeirecht verstoßen.

Gewalt für den guten Zweck: legitim ja, legal nein

Die Beiträge des zweiten Teils »Philosophische Aspekte« kreisen um die Frage nach dem moralischen Status von Gewaltmaßnahmen zur Erzwingung einer Aussage. Es ist Konsens unter den Autoren, dass es zumindest denkbare Szenarien gibt, in denen entsprechende Handlungen vertretbar sind. Kein einziger Beitrag verteidigt die Absolutheit des moralischen Folterverbots.

Im Hintergrund der Argumentation stehen dabei recht unterschiedliche ethische Schwerpunkte oder Prinzipien. Hier finden sich Argumente, die auf die Abwägung kurz- und langfristiger Folgen für das Wohlergehen betroffener Personen abzielen; dahinter steckt die konsequentialistische Ethik, nach der eine Handlung ausschließlich nach ihren Folgen zu beurteilen ist. Manche Autoren schlagen vor, derartige Maßnahmen als Teil von Notwehr- oder Nothilfehandlungen zu verstehen. Eine Alternative bietet auch Uwe Steinhoff aus Oxford, der es in bestimmten Situationen für moralisch vertretbar hält, Schaden direkt oder indirekt auf den schuldigen Verursacher umzuleiten.

Wenn man die Einschätzung teilt, dass in gewissen Situationen der Einsatz von Gewalt zur Herbeiführung von Aussagen moralisch legitim sein kann, stellt sich die Frage: Sollte er dann auch rechtlich erlaubt sein? In dieser Frage spricht sich einzig der Osnabrücker Philosoph Rainer Trapp für eine Legalisierung aus (wenn auch unter streng reglementierten Bedingungen). Unter der Vielzahl der hiergegen vorgebrachten Argumente sticht vor allem der Verweis auf die Gefahr heraus, dass Folter, einmal institutionalisiert, sich über den ursprünglich geplanten Bereich hinaus ausbreitetet und dazu führt, dass mehr und mehr rechtstaatliche Barrieren eingerissen werden.

Es ist der besondere Vorzug dieses Bands, dass es ihm gelingt, eine komplexe Materie durchschaubar zu machen, und zwar nicht durch unzulässige Vereinfachungen, sondern gerade, indem er dem Leser die argumentative Lage in ihrer Komplexität vor Augen führt. Zugleich verdeutlichen die Beiträge, warum es unangemessen wäre, sich mit einfachen und bequemen Antworten zufrieden zu geben.

Gleichwohl bleiben Wünsche offen. Vor allem hat sich keiner der Autoren ausführlich mit den Besonderheiten des Einsatzes von Gewalt zur Informationsgewinnung befasst. Die in verschiedenen Beiträgen geäußerte Idee, den bei Befragungen ausgeübten Zwang »moderat« zu halten und langfristige Schädigungen des Verhörten zu vermeiden, lässt sich mit den herangezogenen Begründungsstrategien nur schwer in Einklang bringen. Wenn der Befragte ein fanatischer Terrorist oder durchgeknallter Geiselnehmer ist, wird er auch dann nicht kooperieren wollen, wenn er auf verlorenem Posten steht. Höchstwahrscheinlich wird er sich von moderaten Gewaltanwendungen nicht beeinflussen lassen. Wer aber unschuldig in ein entsprechendes Verhör gerät, kann sich der Folter gerade nicht durch eine korrekte Aussage entziehen und müsste daher die Verhörtechniken in ihrer gesamten Härte erfahren. In den Beiträgen des Buchs wird das Problem einer möglichen Folterung Unschuldiger jedoch allzu schnell mit dem Hinweis darauf abgetan, dass die Gefahr eines Irrtums bei sämtlichen Straf- und Präventionsmaßnahmen gegeben sei.

Zumindest in dieser Hinsicht liegen also die Dinge noch komplizierter, als es in den umsichtigen und differenzierenden Texten des besprochenen Bands zum Ausdruck kommt.

Jan Gertken

Der Rezensent ist Mitarbeiter am Lehrstuhl für Praktische Philosophie und Ethik der Humboldt-Universität Berlin.

Wolfgang Lenzen (Hg.)
Ist Folter erlaubt?
Juristische und philosophische Aspekte
Mentis, Paderborn 2006. 228 Seiten, € 34,–

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

VORSCHAU

Heft Februar 2008
ab 29. Januar im Handel

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Kosmische Achterbahn

Ist die Inflationsphase des Universums das lang gesuchte Schlüsselexperiment der Stringtheorie? In nicht allzu ferner Zukunft könnten wir mit ihrer Hilfe herausfinden, ob der Kosmos tatsächlich zehn Dimensionen besitzt

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Allergisch gegen Nahrung

Wenn das Immunsystem nicht lernt, im Darm zwar nützliche, aber körperfremde Stoffe zu attackieren, entwickeln sich Allergien

Wie der Schnee flockt

Raffinierte molekulare Prozesse steuern das vielfältige Wachstum der bizarren Kristallstrukturen

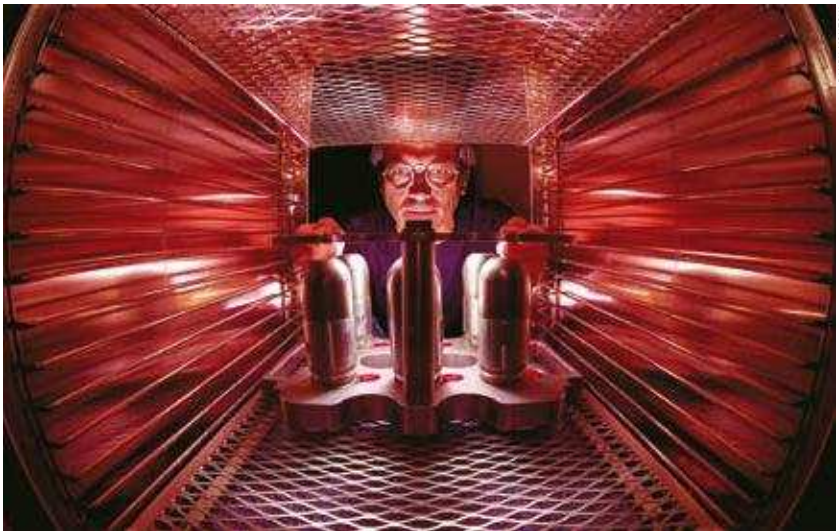
CORBIS, JACK HOLLINGSWORTH

Riskante Narkosen

Im Detail ist über die Wirkung von Narkosemitteln noch wenig bekannt. Neue Forschungen sollen helfen, das medizinisch herbeigeführte Koma genauer zu steuern

Auf dem Weg zur neuen Bombe?

Die US-Regierung plant, den ersten neuen Nuklearsprengkopf seit zwei Jahrzehnten zu bauen – denn allmählich veraltet ihr Arsenal



RANDY MONTOYA

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter